

---

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE NÁUTICA Y MÁQUINAS**

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

ENERGÍA Y PROPULSIÓN

---

TRABAJO FIN DE GRADO

**TFG/GTM/E-33-16**

QUE LLEVA POR TÍTULO

**“INGENIERÍA MARINA:  
MEDIDAS PARA LA REDUCCION DE GASES  
CONTAMINANTES EN MOTORES MARINOS”**

---

DEFENDIDO ANTE TRIBUNAL EN LA SESIÓN DE

**SEPTIEMBRE - 2016**

**HUMBERTO PEÑA ALEMÁN**

DIRECTOR: FELIPE ANTELO GONZÁLEZ



## TRABAJO FIN DE GRADO

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

## ENERGÍA Y PROPULSIÓN

631G02455 - TRABAJO FIN DE GRADO

D. FELIPE ANTELO GONZÁLEZ, en calidad de Director principal, autorizo al alumno D. HUMBERTO PEÑA ALEMÁN, con DNI N° 54657723-V a la presentación del presente Trabajo de Fin de Grado titulado:

## “MEDIDAS PARA LA REDUCCION DE GASES CONTAMINANTES EN MOTORES MARINOS”

DEFENDIDO ANTE TRIBUNAL EN LA SESIÓN DE

SEPTIEMBRE - 2016

Fdo. El Director

Fdo. El Alumno

FELIPE ANTELO GONZÁLEZ

HUMBERTO PEÑA ALEMÁN



## RESUMEN

Las emisiones provenientes de los buques representan el 3% del total de la industria y van en aumento. La exposición a estos tóxicos causa problemas cardiovasculares y respiratorios. A través de la liberación de gases de efecto invernadero (GHG) la industria naval contribuye al cambio climático. Se han ofrecido múltiples soluciones a los armadores para cumplir con las cada día más exigentes normativas. Para contrarrestar los GHG, se construyen motores más eficientes y mejores diseños de propulsores. El uso de combustibles de bajo contenido en azufre, gas natural y torres de lavado (scrubbers) para los gases son algunas opciones para hacer frente a las lluvias ácidas.

## ABSTRACT

Shipping emissions represent 3% of the world's air emissions and the industry's share is increasing. Exposure to toxic emissions cause cardiovascular and respiratory diseases. Through the release of greenhouse gases (GHG), the industry also contributes to climate change. A number of solutions will enable ship owners to comply with the more stringent regulations. To tackle GHG emissions, fuel-efficient engines and propelling systems are the most promising technologies. Lowsulphur fuel, liquid natural gas, and scrubbers will be three options for compliance with regulations governing sulphur oxide emissions.

## RESUMO

As emisións que veñen dos buques representan o 3% do total da industria e van en aumento. A exposición a estes tóxicos causa problemas cardiovasculares e respiratorios. A industria naval libera grandes cantidades de gases de efecto invernadoiro (GHG) que contribúen significativamente ó cambio climático. Para facer fronte ós GHG constrúense motores mais eficientes xunto con novos propulsores. A utilización de combustibles de baixo contido en azufre, o gas natural ou as torres de lavado (scrubbers) para os gases de escape son algunhas das opcións que poden reducir as chuvias ácidas.



# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>GLOSARIO Y TERMINOLOGÍA .....</b>	<b>11</b>
<b>REFERENCIAS CONSULTADAS .....</b>	<b>15</b>
LIBROS.....	15
ARTICULOS.....	15
MANUALES .....	15
INTERNET.....	15
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3 CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES.....</b>	<b>5</b>
3.1 CAMBIO CLIMÁTICO .....	5
3.2 INFLUENCIA DEL TRANSPORTE MARÍTIMO EN MEDIOAMBIENTE .....	8
3.3 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN SOBRE LA VIDA HUMANA.....	9
3.4 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN SOBRE EL ECOSISTEMAS .....	11
3.5 EFECTO DE LA POLUCIÓN SOBRE EL ENTORNO CONSTRUIDO .....	11
<b>4 NORMATIVA ANTIPOLUCIÓN .....</b>	<b>13</b>
4.1 REGULACIÓN TERRITORIAL DE EMISIONES CONTAMINANTES.....	13
4.2 REGULACIONES ESPECÍFICAS DE LOS EEUU Y CHINA.....	15
4.3 REGULACIÓN DE LA OMI.....	15

4.3.1	<i>EL CONVENIO MARPOL</i> .....	16
4.3.1.1	Anexo VI del Convenio MARPOL.....	17
4.3.1.2	Zonas de Control de Emisiones .....	18
4.3.1.3	Designación de las zonas de control de emisiones (ECA) .....	19
4.3.1.4	Regulación MARPOL sobre las emisiones de SOx.....	20
4.3.1.5	Regulación MARPOL sobre las emisiones de NOx .....	22
4.3.1.6	Regulación MARPOL para disminuir las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	25
4.3.2	<i>Seguimiento y control de las emisiones</i> .....	26
4.3.2.1	Sanciones y multas en las zonas ECA de EU.....	29
4.3.2.2	Sanciones y multas en las zonas ECA de China .....	30
<b>5</b>	<b>LA PROPULSIÓN DIESEL EN BUQUES MERCANTES</b> .....	<b>31</b>
5.1	CLASIFICACIÓN DE LA FLOTA MERCANTE MUNDIAL .....	31
5.2	EL MOTOR DIÉSEL MARINO.....	33
5.2.1	<i>CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DIÉSEL MARINOS</i> .....	34
5.2.2	<i>MOTORES DE DOS TIEMPOS</i> .....	35
5.2.3	<i>MOTORES DE CUATRO TIEMPOS</i> .....	36
<b>6</b>	<b>COMBUSTIBLES UTILIZADOS SECTOR MARINO</b> .....	<b>37</b>
6.1	COMBUSTIBLES RESIDUALES PARA USO MARINO .....	37
6.2	COMBUSTIBLES DESTILADOS PARA USO MARINO .....	38
6.3	REQUISITOS DE LOS COMBUSTIBLES PARA USO MARINO .....	38



6.4	COMBUSTIBLES "LOW SULPHUR" PARA USO MARINO.....	45
6.5	EFFECTOS DEL COMBUSTIBLE "LOW SULPHUR" EN EL MOTOR.....	46
6.5.1	<i>EFFECTOS POR REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD Y LUBRICIDAD...</i>	<i>46</i>
6.5.2	<i>EFFECTOS POR LA BAJA DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE .....</i>	<i>49</i>
6.5.3	<i>EFFECTOS DE LA INCOMPATIBILIDAD DE COMBUSTIBLES .....</i>	<i>49</i>
6.5.4	<i>Efectos del cambio de lubricante según el combustible .....</i>	<i>49</i>
<b>7</b>	<b>FORMACIÓN DE CONTAMINANTES .....</b>	<b>51</b>
7.1	COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE EXHAUSTACIÓN .....	51
7.2	FORMACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO <sub>x</sub> ) .....	52
7.3	FORMACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE AZUFRE (SO <sub>x</sub> ).....	52
7.4	FORMACIÓN DE LA MATERIA PARTICULADA (PM).....	53
7.5	HIDROCARBUROS (HC) .....	54
<b>8</b>	<b>TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES AÉREAS .....</b>	<b>55</b>
8.1	TÉCNICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE NOX .....	55
8.1.1	<i>OPTIMIZACIÓN DEL MOTOR.....</i>	<i>56</i>
8.1.2	<i>INYECCIÓN DIRECTA DE AGUA AL CILINDRO .....</i>	<i>60</i>
8.1.3	<i>HUMIDIFICACIÓN DE LA CARGA DE AIRE .....</i>	<i>61</i>
8.1.4	<i>RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE (EGR).....</i>	<i>63</i>
8.1.5	<i>REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (SCR) .....</i>	<i>67</i>
8.2	TÉCNICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE SOX.....	73

8.2.1	USO DE COMBUSTIBLE DE BAJO CONTENIDO DE AZUFRE.....	73
8.2.2	USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS .....	76
8.2.3	TECNICAS DE LAVADO DE GASES DE ESCAPE (SCRUBBER)...	77
8.2.3.1	Depurador de gases en seco .....	81
8.2.3.2	Depurador de gases húmedo en circuito abierto.....	84
8.2.3.3	Depurador de gases húmedo en circuito cerrado .....	87
8.2.3.4	Depurador de gases híbrido.....	90
9	VALORACIÓN ECONÓMICA DE INSTALAR UN SCRUBBER.....	93
10	CONCLUSIONES .....	99

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 3.1.1 - Termografía del calentamiento de la tierra a largo plazo .....	6
Figura 3.1.2 - Aumento de 1 °C de temperatura desde 1880 a 2016.....	7
Figura 4.3.1.2.1 - Zonas de Control de Emisiones según la OMI.....	19
Figura 4.3.1.4.2 - Normas aplicadas por MARPOL VI para emisiones de SOx ..	21
Figura 4.3.1.4.3 - Normas aplicadas por MARPOL VI para emisiones de SOx ..	23
Figura 4.3.2.1 - Tráfico real por el Canal de la Mancha (el 31/07 a las 14 h).....	27
Figura 4.3.2.2 - Futuro proyecto de monitoreo de la NASA .....	28
Figura 5.1.1 - Cantidad de buques por tipos. ....	32
Figura 6.5.1.1 - Gráfica que relaciona la temperatura y viscosidad .....	47
Figura 6.5.1.2 - Instalación de enfriador para trabajar con LSGO en trópicos ....	48
Figura 7.1.1 - Principales componentes de los gases de escape según MAN....	51
Figura 8.1.1.1 - Evolución en el diseño de inyectores de combustible .....	58
Figura 8.1.2.1 - Sistema de inyección de agua directa de Wärtsilä.....	61
Figura 8.1.3.1 - Sistema de humidificación de la carga de aire.....	62
Figura 8.1.4.1 - Reducción de NOx a bordo del buque Alexander Maersk .....	63
Figura 8.1.4.2 - Elementos principales del EGR. ....	64
Figura 8.1.4.3 - Esquema del circuito de un EGR. ....	66
Figura 8.1.4.4 - Un equipo EGR instalado en el buque "Maersk Cardiff" .....	66
Figura 8.1.4.5 - Sistema EGR integrado en un motor de dos tiempos .....	67

Figura 8.1.5.1 - Catalizador Selectivo .....	68
Figura 8.1.5.2 - Sistema SCR integrado en el motor.....	71
Figura 8.1.5.3 - Sistema SCR instalado en un motor .....	72
Figura 8.1.5.4 - Esquema de componentes de un sistema SCR .....	72
Figura 8.2.3.1 - Diferentes configuraciones internas de depuradores.....	80
Figura 8.2.3.2 - Tipos de depuradores de gases usados a bordo de buques. ....	81
Figura 8.2.3.1.1 - Depurador de gases tipo seco, principales componentes.....	82
Figura 8.2.3.1.2 - Sistema combinado SCR con depurador de gases .....	84
Figura 8.2.3.2.1 - Circuito de limpieza de gases tipo abierto. ....	85
Figura 8.2.3.3.1 - Circuito de limpieza de gases tipo cerrado. ....	88
Figura 8.2.3.4.1 - Sistema hibrido depurador de gases. ....	91
Figura 9.1 - Relación de precios depurador/potencia motor principal .....	93
Figura 9.2 - Tasa de retorno de la inversión en comparación con el coste del combustible y el porcentaje de navegación en zona ECA. ....	97
Figura 9.3 - Principales componentes del sistema limpieza de escapes. ....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.3.1.2.1 - Límite de emisiones de SO <sub>x</sub> .....	18
Tabla 4.3.1.4.2 - Límites de emisiones de NO <sub>x</sub> .....	23
Tabla 4.3.2.1.1 - Multas por país en caso de no cumplimiento.....	29
Tabla 6.3.1 - Combustibles marinos según norma ISO 82217 / 2012.....	39
Tabla 6.3.2 - Relación viscosidad/contenido azufre.....	44
Tabla 8.2.3.1 - Principales fabricantes de depuradores.....	78
Tabla 9.1 - Principales datos del buque.....	95
Tabla 9.2 - Perfil operativo del buque.....	95
Tabla 9.3 - Consumo de combustible promedio.....	95
Tabla 9.4 - Gastos instalación del depurador.....	96
Tabla 9.5 - Comparativa de precios entre 2015 y 2016.....	96



## GLOSARIO Y TERMINOLOGÍA

- AIS: Sistema de Identificación Automática.
- AMVER: Sistema Automatizado de Asistencia Mutua para salvamento de buques
- Cu: Cobre.
- CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono.
- CH<sub>4</sub>: Metano.
- CFR: Código de regulaciones federales de los Estados Unidos.
- CCAI: Índice aromaticidad de carbono.
- CFD: Computacional Fluid Dynamics.
- °C: Grado centígrado.
- CO: Monóxido de carbono.
- C/O VALVE: Válvula de cambio.
- CBV: Válvula de derivación al cilindro.
- CaSO<sub>4</sub>: Sulfato de calcio sólido.
- CaSO<sub>3</sub>: Sulfito de calcio.
- Ca (OH)<sub>2</sub>: Hidróxido de calcio.
- CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>: Urea.
- Cr: Cromo.
- DNV: Det Norske Veritas.
- DWI: Inyección directa agua.
- ECA: Zona de control de emisión.
- NECA: Zona de control de NOx.
- EGC: Sistema de limpieza de gases de escape.
- EIAPP: Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores.
- EEDI: Índice de eficiencia energético de diseño.
- EGR: Recirculación de gases de escape.
- EGE: Economizador de gases de escape.
- ECR: Recirculación de gases de escape.
- EEA: Agencia Europea de Medio Ambiente.
- EPA: Agencia protección del medio ambiente de los Estados Unidos.

- Fe: Hierro.
- GISS: Instituto Goddard de estudios espaciales de la NASA.
- GNL: Gas natural licuado.
- GEI: Gases efecto invernadero.
- g: Gramo.
- HC: Hidrocarburos no quemados.
- HFO: Combustible fueloil pesado.
- H<sub>2</sub>S: Sulfuro de hidrogeno
- H<sub>2</sub>O: Vapor de agua.
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: Ácido sulfúrico.
- IMO: Organización Marítima Internacional.
- IPCC: Grupo intergubernamental de expertos cambio climático.
- IARC: Centro internacional de investigación contra el cáncer.
- ICOADS: Base de datos sobre las condiciones meteorológicas.
- IFO: Combustible fueloil intermedio.
- ISO DMB: Combustible usado para el funcionamiento de los motores.
- ISO DMA: Mezcla de MDO y DMB con un 0,1% de azufre.
- LNG: Gas Natural Licuado.
- LRIT: Sistema de identificación y seguimiento de largo alcance.
- LSFO: Combustible bajo de azufre.
- LSGO: Combustible gas oil bajo de azufre.
- LSHFO: Combustible pesado de bajo azufre.
- MGO: Combustible marino gas oil.
- MDO: Combustible Marino diésel oil.
- MEPC: Comité de protección del medio marino.
- MARPOL: Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación Marina
- MRV: Monitoreo, Reporte y Verificación de Emisiones de CO<sub>2</sub>.
- NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio.
- mg/Nm<sup>3</sup>: Miligramos por metros cúbicos.
- NO: Óxido nítrico.
- NO<sub>x</sub>: Óxido de nitrógeno.
- NECA: Zona de control de NO<sub>x</sub>.
- NO<sub>2</sub>: Dióxido nítrico.



- $\text{NH}_3$ : Amoníaco.
- NB: Numero de base.
- $\text{NaOH}$ : Hidróxido de sodio.
- $\text{N}_2$ : Gas nitrógeno.
- $\text{NH}_2\text{CO}$ : Urea.
- NAAQRS: Estándares nacionales de calidad del aire ambiental.
- OMI: Organización Marítima Internacional.
- OMS: Organización Mundial de la Salud.
- $\text{O}_3$ : Ozono troposférico.
- OCMI: Organización Consultiva Marítima Intergubernamental.
- OPEX: Gastos operativos.
- OPEP: Organización de Países Exportadores de Petróleo.
- PM: Materia particulada.
- ppm: Partes por millón.
- Pt: Platino.
- Pd: Paladio.
- SO: Monóxido de azufre.
- S/D valve: Válvula de cierre.
- SCRUBBER: Depurador.
- $\text{SO}_x$ : Óxido de azufre.
- SCR: Reducción catalítica selectiva.
- $\text{SO}_3$ : Trióxido de azufre.
- $\text{SO}_2$ : Dióxido de azufre.
- TBR: Tonelada de registro bruto.
- T/C: Turbocompresor.
- UE: Unión Europea.
- VIT: Sincronización variable de inyección.
- VEC: Válvula de escape variable de cierre.
- WMC: Rejilla separadora de agua.



## REFERENCIAS CONSULTADAS

### Libros

- POUNDERS, D. - "Marine Diesel Engines and Gas Turbines", 9ª Edición, Editorial Elsevier, Burlington (2009)
- WHARTON, J. - "Diesel Engines", 2ª Edición, Editorial Standfor Maritime, London (2006)

### Artículos

- HOLTBECKER, R. and GEIST, M. - "Emissions Technology, Sulzer RTA Series, Exhaust Emissions Reduction Technology for Sulzer Marine Diesel Engines". 1998, Wärtsilä NSD
- MAN B&W - Two-stroke Diesel Engines - Emission Control

### Manuales

- MAN DIESEL & TURBO - Tier III Two Stroke Technology. Exhaust Gas Scrubber Systems. ABC (2015).
- WÄRTSILÄ NSD - Costs of Emission Reduction Technologies for Category 3 Marine Engines (2014)

### INTERNET

- <http://www.airclim.org/air-pollution-ships> [acceso 14/07/2016]
- <http://www.fathommaritimeintelligence.com/> [acceso 23/07/2016]
- <http://www.intechopen.com/books/current-air-quality-issues/seatransport-air-pollution> [acceso 14/07/2016]
- <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Air-Pollution.aspx> [acceso 15/07/2016]
- [http://www.lr.org/en/images/22977064>Your\\_options\\_for\\_emissions\\_compliance.pdf](http://www.lr.org/en/images/22977064>Your_options_for_emissions_compliance.pdf) [acceso 29/07/2016]

- <http://www.nasa.gov/feature/langley/the-future-of-monitoring-air-quality-from-space> [acceso 15/07/2016]
- <http://www.iarc.fr/> [acceso 26/07/2016]
- <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015> [acceso 15/07/2016]
- <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/air/en.pdf> [acceso 15/07/2016]
- [http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%e2%80%93-Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Sulphur-oxides-(SOx)-%e2%80%93-Regulation-14.aspx) [acceso 02/08/2016]
- [http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%e2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Nitrogen-oxides-(NOx)-%e2%80%93-Regulation-13.aspx) [acceso 02/08/2016]
- <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/air/en.pdf> [acceso 02/08/2016]
- <http://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-0/centery:50/zoom:85> [acceso 03/08/2016]
- <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html> [acceso 03/08/2016]
- <http://www.eea.europa.eu/es/themes/air> [acceso 02/08/2016]
- [http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/atmosfera/Los-contaminantes-atmosfericos.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/atmosfera/Los-contaminantes-atmosfericos.asp) [acceso 02/08/2016]
- [shattering-global-wa](#) [acceso 02/08/2016]
- <http://www.infoplease.com/encyclopedia/science/internal-combustion-engine-reciprocating-engines.html> [rm-temperatures-in-2015](#) [acceso 25/08/2016]
- <http://inventors.about.com/od/famousinventions/fl/Rudolf-Diesel-Inventor-of-the-Diesel-Engine.htm> [Rodolf Diesel](#) [acceso 20/08/2016]
- [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com) [acceso 02/08/2016]
- <http://www.lidar-uk.com/what-is-lidar/> [acceso 18/08/2016]
- [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping/index_en.htm) [acceso 19/08/2016]

- <http://www.eea.europa.eu/es/publications/senales-de-la-aema-2015>  
[acceso 20/07/2016]
- <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> [acceso 27/08/2016]
- <http://www.lr.org/en/news-and-insight/articles/Tier-III-emission-limit-for-NOx.aspx> [acceso 09/08/2016]
- <http://www.greenship.org/fpublic/greenship/dokumenter/Downloads%20-%20maga/ECA%20study/GSF%20ECA%20Technical%20report.pdf>  
[acceso 17/08/2016]
- <https://www.isl.org/en/news/latest-developments-implementation-scrubbers> [acceso 28/08/2016]
- <http://marine.man.eu/applications/projectguides/2stroke/content/printed/megi.pdf> [acceso 18/08/2016]
- [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015\\_en.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015_en.pdf) [acceso 25/08/2016]
- <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/tier-iii-two-stroke-technology.pdf?sfvrsn=18> [acceso 19/08/2016]
- <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/operation-on-low-sulphur-fuels.pdf?sfvrsn=20> [acceso 21/08/2016]
- [http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2013/Scrubber\\_Advisory.pdf](http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2013/Scrubber_Advisory.pdf) [acceso 13/08/2016]
- <http://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/presentation-o-env-exhaust-gas-cleaning-systems.pdf?sfvrsn=10>  
[acceso 22/08/2016]
- <https://www.isl.org/en/news/latest-developments-implementation-scrubbers> [acceso 29/08/2016]
- <http://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/nabu-seca-studie2016.pdf> [acceso 06/08/2016]
- <https://www.bimco.org/> [acceso 04/09/2016]
- <http://www.emsa.europa.eu/> [acceso 02/09/2016]
- <http://www.bunkerworld.com/> [acceso 02/09/2016]
- <http://www.bunkerindex.com/> [acceso 03/09/2016]



# **“MEDIDAS PARA LA REDUCCION DE GASES CONTAMINANTES EN MOTORES MARINOS”**

---

## **MEMORIA**

---

**GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS**

**ENERGÍA Y PROPULSIÓN**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS**

**FECHA: SEPTIEMBRE - 2016**

**AUTOR: El alumno**

**Fdo.: HUMBERTO PEÑA ALEMÁN**





# 1 INTRODUCCIÓN

*"Porque en última instancia, nuestro vínculo común más básico es que todos habitamos este pequeño planeta. Todos respiramos el mismo aire"*

*(J F. Kennedy).*

Cada día el mundo aumenta su interés y preocupación por la salud del medio ambiente principalmente a lo referente a la emisión de gases contaminantes proveniente de diferentes sectores. El aumento de conciencia de la humanidad respecto al peligro que acarrea las emisiones de gases nocivos, aparejado con medidas cada vez más restrictivas por las principales organizaciones encargadas de evitar y disminuir dicho efecto, ha traído consigo la necesidad de tomar medidas encaminadas a revertir la situación mejorando la eficiencia de las instalaciones.

En lo que respecta al sector del transporte marítimo tiene que cumplir con las regulaciones prescriptas por la OMI a través del MARPOL Anexo VI, en la cual se regula las emisiones atmosféricas provenientes de los buques.

A raíz del endurecimiento de las regulaciones establecidas por la OMI y la UE, respecto a los límites de emisiones proveniente de los buques, los armadores han tenido que decidirse por tomar medidas drásticas, tales como pasar a utilizar combustibles con bajo porcentaje de azufre o instalar a bordo algún tipo de tecnología de limpieza de gases. Ambas decisiones tienen un coste significativo para el armador, que tendrá que cumplir con las regulaciones de carácter obligatorio, con respecto a las emisiones de NOx, y SOx, en las zonas de control de emisiones conocidas como (en adelante "ECA") y en puertos europeos, cuyo incumplimiento puede acarrear la detención del buque acompañada de fuertes multas.

Decidirse por aplicar determinadas medidas o tecnologías no es tarea fácil, a pesar de que existe un mercado que ofrece este servicio con años de experiencia y pruebas de sus tecnologías a bordo de diferentes buques. Bien es

sabido por propia experiencia la gran limitante que tenemos en nuestro centro de trabajo, llamado cuarto de máquinas, que a veces una sencilla tarea como una limpieza de un intercambiador de calor se convierte en un difícil trabajo y horas dedicadas, todo esto provocado por la ubicación y el reducido espacio en el que se encuentran la mayoría de los equipos, factor este que mejora con el tamaño del buque.

El factor espacio es uno de los principales impedimentos a la hora de decidirse por un tipo de tecnologías de limpieza, ya que la misma viene acompañada con equipos anexos cuya ubicación sería imposible en un cuarto de máquinas con espacio reducido.

En la práctica muchos armadores tendrán que decidirse por usar combustibles reglamentarios de bajo contenido de azufre por el impedimento de espacio para poder ubicar alguna tecnología de limpieza, por lo que se les incrementaría el gasto de combustible razón está por la que tendrán que aumentar el coste de sus fletes.

Otros factores a tener, serían el tiempo que navega el buque en zonas de control y estancia en la misma, años de vida útil del buque, factor importante, en los cálculos de tiempo de amortización de la inversión.

Situación más favorable la tienen los buques de nuevas construcciones los cuales se construirían con la posibilidad y las garantías de cumplir, los reglamentos respecto a los límites de emisiones, presentes y futuras.

El Gas Natural Licuado GNL como combustible es otro ejemplo interesante que elimina el SOx y NOx sustancialmente e incluso reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> ligeramente, pero requiere grandes inversiones, tanto a bordo como en tierra firme para estaciones de servicio.

## 2 OBJETIVOS

En este trabajo se realizará un análisis de las tecnologías y medidas utilizadas para controlar y disminuir las emisiones de contaminantes ocasionadas por los buques, un tema complicado para la mayoría de los implicados en este sector ya sea por la obligatoriedad de cumplir con las reglas, y por otro lado el gasto económico, logístico y preparatorio para poder implantar una nueva tecnología o realizar modificaciones para poder cumplir con las regulaciones del MARPOL.

También se llevará a cabo un análisis de los efectos del cambio de combustible sobre el motor de propulsión y se relacionarán algunas recomendaciones para operar con combustibles ligeros.

Dado que no existe una solución simple y única que reduzca todos los componentes perjudiciales de las emisiones y, a la vez, existen sistemas individuales disponibles para reducir las emisiones de uno o dos componentes, es importante pero pueden aumentar otros. Por ejemplo, los depuradores Scrubber que reducen las emisiones de SO<sub>x</sub> y PM, pero aumentan las emisiones de CO<sub>2</sub>, y todavía es poco común ver depuradoras combinadas con otros sistemas reductores de NO<sub>x</sub>. Otro ejemplo es el cambio de combustible con bajo contenido de azufre para reducir el SO<sub>x</sub>, pero no reducirá las emisiones de NO<sub>x</sub>.

Por ello, se revisarán las técnicas más utilizadas en el sector marino para reducir las emisiones provenientes de los motores y ofrecer una valoración económica de la implantación de alguna de ellas

Como última opción, el uso del Gas Natural Licuado (GNL) como combustible es otro ejemplo interesante que elimina el SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> sustancialmente e incluso reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> ligeramente, pero requiere grandes inversiones, tanto a bordo como en tierra firme para el "bunkering" de buques.



### 3 CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

#### 3.1 CAMBIO CLIMÁTICO

La definición común del cambio climático, es la variación global del clima de la tierra provocado por dos causas, una por causas naturales y la otra por las actividades humanas incrementadas desde la revolución industrial que comenzó alrededor del año 1750 provocando el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la quema de combustibles fósiles, y se manifiesta sobre los parámetros climáticos tales como, temperatura, precipitaciones, nubosidad, aumento del nivel del mar y derretimiento de los glaciares.

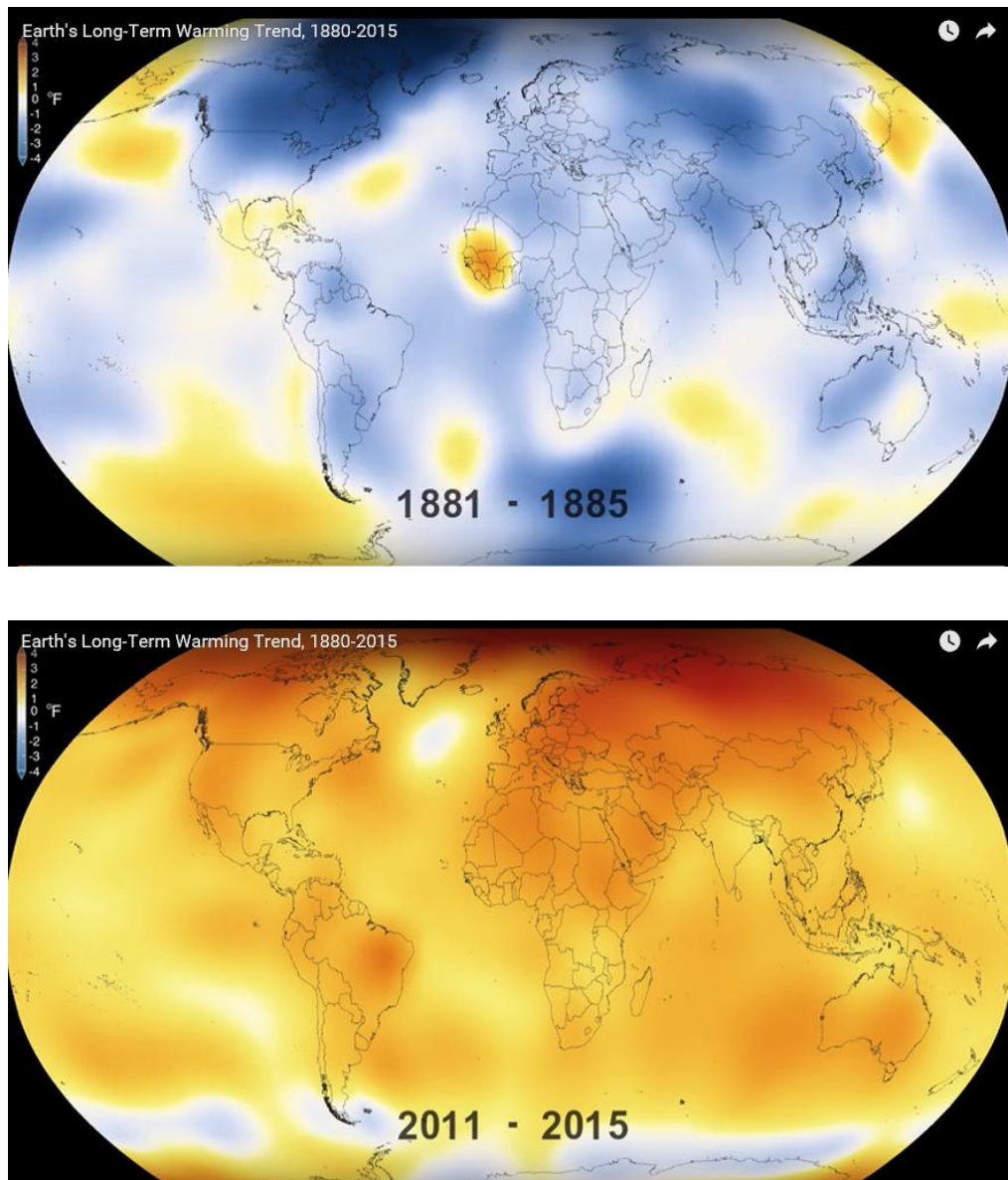
Lograr que los Gobiernos y principales Organizaciones Mundiales tomaran el tema del cambio climático en serio no ha sido tarea fácil. Gracias a esfuerzos de organizaciones como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) y pruebas científicas consolidadas, se ha logrado un consenso generalizado de que el modo de producción y consumo energético está generando una alteración climática global, que provocara, a su vez, serios impactos tanto sobre la tierra como sobre los sistemas socioeconómicos.

Uno de los factores que provoca el cambio climático son los llamados gases de efecto invernadero que actúan como una manta alrededor de la tierra la cual atrapa el calor del sol en la atmosfera y ocasiona que se caliente. Este fenómeno es necesario para sustentar la vida en la tierra y mantener su temperatura habitable, sin embargo la acumulación y el aumento de gases de efecto invernadero puede cambiar el clima de la tierra y ocasionar efectos negativos sobre los ecosistemas, medio ambiente natural y la salud humana en general. ligeros.

Entre los gases de efecto invernadero se encuentran el dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, el óxido de nitrógeno NO<sub>x</sub> y el metano CH<sub>4</sub> que son liberados por la industria, sectores del transporte la agricultura y la combustión de combustibles fósiles

Durante el presente siglo se proyecta que el calentamiento global habrá de continuar y los cambios climáticos probablemente habrán de intensificarse. Los

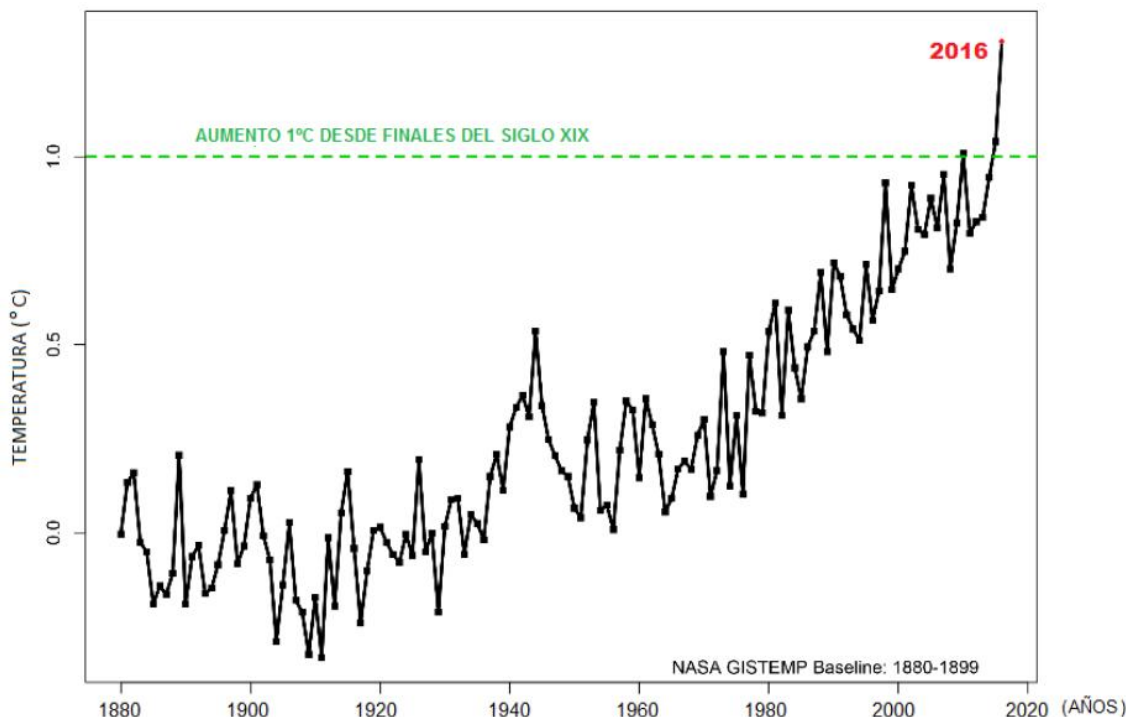
científicos han utilizado modelos climático (figura 4.3.1.1) para proyectar los diferentes aspectos del clima futuro, incluyendo la temperatura, la precipitación la nieve y el hielo, el nivel del océano y la acidez oceánica. Dependiendo de las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero y de cómo el clima responda se proyecta que las temperaturas medias globales habrán de aumentar de 1,1 °C a 6,4 °C a nivel mundial.



**Figura 3.1.1 - Termografía del calentamiento de la tierra a largo plazo, el color azul representa las temperaturas más frías, y el color naranja las más cálidas**

Fuente: <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015>

Según el instituto Goddard de estudios espaciales (GISS), el primer semestre del 2016, se registraron las temperaturas más altas de la historia, con un promedio de temperatura de 1,3 °C más altas que las de finales del siglo XIX.



**Figura 3.1.2 - Aumento de 1 °C de temperatura desde el primer registro en 1880 y récord de temperatura primer semestre 2016**

Fuente: <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015>

Los gases de efecto invernadero y la emisión de otros contaminantes al aire es tanto un problema ambiental como social, ya que conduce a una multitud de efectos adversos en la salud humana, los ecosistemas, el entorno construido y el clima. La contaminación del aire representa el mayor riesgo para la salud ambiental del planeta en la actualidad. La contaminación del aire requiere retos en términos de gestión y mitigación. Una acción eficaz para reducir los impactos de la contaminación del aire es una buena comprensión de las fuentes que lo causan, composición de sus elementos y cómo interactúan en la atmósfera.

En el ámbito de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, la comunidad internacional ha acordado limitar el incremento de la temperatura media del planeta a 2 °C por encima de los niveles preindustriales.

Si la temperatura media global aumenta más de 2 °C, el cambio climático tendrá efectos mucho más graves para nuestra salud, para el medio ambiente natural y para la economía. Un incremento medio de 2 °C significa que las temperaturas se elevarán más de esos 2 °C en determinadas partes del mundo, sobre todo en el Ártico, donde el impacto será mayor y pondrá en peligro sistemas naturales únicos.

La Unión Europea ha marcado ambiciosos objetivos de mitigación del cambio climático a largo plazo. En 2013, la UE ya había reducido sus emisiones de gases de efecto invernadero un 19% con respecto a los niveles de 1990. El objetivo de reducción del 20% para 2020 está al alcance.

### **3.2 INFLUENCIA DEL TRANSPORTE MARÍTIMO EN MEDIOAMBIENTE**

El transporte marítimo no está al margen de los cambios climáticos, es un contribuyente activo por sus emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>. Los buques tienen una alta demanda de combustible como resultado de un uso continuo de combustible en los motores principales, motores auxiliares y calderas durante la navegación, mientras que durante su estancia en puerto los motores auxiliares siguen funcionando algunos pueden quemar combustibles residuales que tienen un alto contenido de azufre y de nitrógeno en comparación con los combustibles destilados como el MGO. Los niveles más altos de exposición a la contaminación del aire se encuentran en los puertos y áreas cercanas, ya que casi el 80% de la flota mundial se encuentra navegando cerca de las costas y en puertos.

En reconocimiento de la magnitud del desafío del cambio climático y la importancia de la acción global para hacer frente a ella, la OMI ha estado tomando medidas para hacer frente a las emisiones procedentes de la navegación internacional y continuará contribuyendo a los objetivos mundiales de reducción de los gases de efecto invernadero. La Organización y sus Estados Miembros reconocen la importante necesidad de que el transporte marítimo internacional, que representa el 2,2% de las emisiones antropógenas de CO<sub>2</sub>,



apoye los esfuerzos mundiales para mitigar las repercusiones del cambio climático.

A pesar que más del 80% del volumen del comercio mundial de mercancías se transporta por mar, la contribución del transporte marítimo a las emisiones globales de carbono puede ser relativamente baja cuando se analiza por unidad de volumen de carga y distancia recorrida en comparación con otros medios de transporte, sin embargo estas emisiones en escenarios de pronóstico a mediano plazo, si no se controlan, es posible que aumenten entre un 50% y 250% hasta el 2050, dependiendo del crecimiento económico y la demanda mundial de energía.

Hasta la fecha, la OMI es la única organización que han adoptado medidas de eficiencia energética que son jurídicamente vinculantes en el conjunto de sector mundial y que se aplican a todos los países miembros. Entraron en vigor en virtud de las enmiendas mediante la resolución MEPC.203 (62) al Convenio del MARPOL Anexo VI el 1 de enero 2013 las normas de eficiencia energética obligatorias para los buques nuevos, y las medidas operacionales de carácter obligatorio para reducir las emisiones de los buques existentes. Esto conlleva que, para 2025, todos los buques nuevos serán unos 30% más eficientes energéticamente que los actuales en servicio.

Otras medidas importantes adoptadas por la OMI son las relacionadas con las regulaciones de emisiones de los óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre así como la aprobación de las llamadas zonas de control de emisiones ECAs.

### **3.3 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN SOBRE LA VIDA HUMANA**

Se estima que, en 2050, las olas de calor causarán 120.000 muertes anuales más de lo habitual en la Unión Europea (UE), con un coste económico de 150.000 millones de euros si no se adoptan medidas adicionales.

La contaminación del aire antropogénica, representa un importante riesgo medioambiental para la salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS)

estima que un 80% de las defunciones prematuras relacionadas con la contaminación del aire se deben a cardiopatía isquémica y accidente cerebrovascular, mientras que un 14% se deben a neumopatía obstructiva crónica o infección aguda de las vías respiratorias inferiores, y un 6% a cáncer de pulmón.

Un reporte realizado en el 2013 por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC) determinó que la contaminación del aire es carcinógena para el ser humano y que las partículas del aire contaminado están estrechamente relacionadas con la creciente incidencia del cáncer de pulmón, cáncer de vías urinarias y vejiga.

Los principales contaminantes perjudiciales para la salud son:

- Óxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )
- Óxido de Azufre ( $\text{SO}_x$ )
- Ozono troposférico ( $\text{O}_3$ )
- Partículas (PM)

Los óxidos de nitrógeno proveniente de los procesos de combustión en concentraciones de corta duración superiores a  $200\text{mg/m}^3$ , es un gas toxico que causa una importante inflamación en las vías respiratorias. Estudios epidemiológicos lo han relacionado con el aumento de bronquitis en niños asmáticos y reducción de la capacidad pulmonar. Los óxidos de azufres provocan irritación ocular y pueden afectar al sistema respiratorio provocando infecciones y bronquitis crónica. El exceso de ozono troposférico puede causar efectos adversos de consideración en la salud humana, puede causar problemas respiratorios, provocar asma, y reducir la función pulmonar.

Los procesos de combustión de los motores diésel siempre emiten partículas sólidas o liquidas en forma de pequeñas gotas. Estas partículas constituyen una compleja mezcla de sustancias orgánicas presentes en la atmosfera y la concentración. Las mismas se clasifican en PM10, PM2.5 y PM0.1 conocidas como partículas ultrafinas. Las partículas PM10 con menos de 10 micrones de diámetro ( $\mu\text{m}$ ) se conocen como partículas gruesas y pueden alojarse en la

tráquea o en los bronquios, las partículas PM<sub>2.5</sub> conocidas como partículas finas pueden llegar hasta los alveolos pulmonares y las partículas ultrafinas o PM<sub>0.1</sub> que pueden llegar al torrente sanguíneo. La exposición crónica a las partículas aumenta el riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón.

### **3.4 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN SOBRE EL ECOSISTEMAS**

La contaminación del aire tiene varios impactos ambientales importantes y pueden afectar directamente a la vegetación, así como la calidad del agua y el suelo. El aumento del ozono O<sub>3</sub> puede provocar daños a nivel del suelo a los cultivos, bosques y plantas mediante la reducción de sus tasas de crecimiento. La Comisión Europea estima que el costo de pérdida de rendimiento de los cultivos en el año 2010 fue alrededor de 3.000 millones de euros. Otros contaminantes, como los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, el SO<sub>x</sub> y el amoníaco NH<sub>3</sub> contribuyen a la acidificación del suelo, lagos y ríos, provocando la pérdida de la vida animal y vegetal. Además de causar la acidificación, NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> también perturban los ecosistemas terrestres y acuáticos mediante la introducción de cantidades excesivas de nutrientes de nitrógeno. Esto conduce a la eutrofización, que es un exceso de nutrientes que pueden conducir a cambios en la diversidad de las especies y de las invasiones de especies nuevas.

### **3.5 EFECTO DE LA POLUCIÓN SOBRE EL ENTORNO CONSTRUIDO**

La contaminación del aire también puede dañar los materiales y edificios, incluyendo los edificios más significativos en lo cultural de Europa. El impacto de la contaminación atmosférica sobre los materiales del patrimonio cultural es un problema grave, ya que puede conducir a la pérdida de partes de nuestra historia y cultura. El daño incluye la corrosión, la biodegradación y la suciedad. Las emisiones de contaminantes del aire se depositan y acumulan en las superficies de los edificios las paredes, ventanas y techos, compuestos principalmente de

piedra, ladrillos, cemento, vidrio, madera y cerámica, se decoloran y sufren pérdida de material, fallo estructural y suciedad. De particular importancia es la corrosión causada por la acidificación de los compuestos como óxidos de azufre  $\text{SO}_x$  y óxidos de nitrógeno,  $\text{NO}_x$ , así como dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ . Los  $\text{SO}_x$  causan daños a muchos tipos de materiales, bien directa o indirectamente. Un alto contenido de  $\text{SO}_x$  en el aire produce la aceleración de la corrosión de los metales tales como el acero al carbono, zinc, acero galvanizado, compuestos del cobre, níquel y aluminio. Esta aceleración se ve favorecida por la presencia de partículas depositadas por la humedad y por la temperatura. Los costos de los daños a los edificios se estimaron en alrededor de 1.000 millones de euros en 2010.

La Directiva Europea 1999 /32 /CE, modificada en el 2012/33 /UE se relaciona con el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo. Además de la incorporación de los bálticos ECA- $\text{SO}_x$  y del Mar del Norte ECA- $\text{SO}_x$ , la legislación nacional, los estados miembros de la Unión Europea se dirigen a garantizar que todos los buques, independientemente de la bandera, utilizan el combustible que contiene no más de 0,10% de azufre en el muelle, que se define como incluyendo los buques fondeados en el puerto. Cualquier operación de cambio de combustible debe ocurrir tan pronto como sea posible después del ataque y lo más tarde posible antes de la salida, y estar conectado. La Directiva exige también que durante el servicio "regular" entre los puertos de los Estados miembros y en aguas de la UE, los buques de pasaje deben utilizar combustible que contiene no más de 1,50% de azufre, a menos que en la ECA- $\text{SO}_x$  en cuyo caso se aplica el límite inferior de la ECA- $\text{SO}_x$ .

## **4 NORMATIVA ANTIPOLUCIÓN**

### **4.1 REGULACIÓN TERRITORIAL DE EMISIONES CONTAMINANTES**

Además de las regulaciones emitidas por la Comisión Europea, otras regiones y países han puesto en práctica regulaciones de emisiones. Cada país se reserva su derecho de soberanía para imponer regulaciones extras para evitar o disminuir las emisiones de los buques tanto nacionales como extranjeros en sus puertos. En las zonas donde las Zonas de Control (ECA) no están establecidas y donde el transporte marítimo representa una fuente importante de emisiones de  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ , las iniciativas voluntarias han surgido en un esfuerzo para anticipar el futuro las ECA. Por ejemplo en Singapur una iniciativa voluntaria fue creada por las compañías navieras para reducir las emisiones de  $\text{SO}_x$ . Las autoridades portuarias de Singapur ofrecen incentivos financieros para las empresas que utilizan tecnologías de limpieza de gases o utilicen combustibles de bajo contenido de azufre.

En cuanto a la normativa europea para la regulación del valor límite de azufre en los combustibles marinos, según la directiva UE 1999/32/EC, Artículo 4, junto con las enmiendas para la normativa UE 2012/33/EC, el contenido de azufre en los combustibles marinos dentro de las aguas territoriales de un Estado miembro de la Unión Europea, no debe exceder del 0,10% en peso. Esto es aplicable a todos los buques, independientemente de su bandera. De esta forma, desde el 1 de enero de 2010 tampoco podrá exceder el 0,1% de contenido en azufre en los combustibles marinos ningún buque que esté en puerto con la excepción de que sea una estancia corta (demora) inferior a 2 horas. La Directiva exige también que durante el servicio regular entre los puertos de los Estados miembros y en aguas de la UE, los buques de pasaje deben utilizar combustible que contiene no más de 1,50% de azufre, al menos que navegue en zona ECA en cuyo caso se aplica el límite inferior de 0,1%.

En el 2012 la Comisión Europea sugirió que las emisiones de  $\text{CO}_2$  de la UE procedentes del transporte marítimo se deben reducir por lo menos el 40% de los niveles de 2005 para el año 2050, y si es factible en un 50%. Sin embargo, la

navegación internacional no está incluida como objetivos de reducción de las emisiones actuales de la UE. En 2013, la Comisión estableció una estrategia para la integración progresiva de las emisiones marítimas en la política de la UE para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero doméstico. La estrategia consiste en 3 pasos consecutivos:

- Monitoreo, reporte y verificación (MRV) de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los grandes buques que utilizan puertos de la UE.
- Objetivos de reducción de gases de efecto invernadero para el sector del transporte marítimo.
- Medidas adicionales, incluidas las medidas basadas en el mercado, en el medio y largo plazo.

El Reglamento del MRV adoptado en 2015 crea un marco jurídico comunitario para el monitoreo, reporte y verificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo. También ayuda a la UE a generar el impulso para el mejor resultado posible en las discusiones internacionales.

El Reglamento exige que los buques de más de 5 000 toneladas de registro brutos (TBR) que hagan escala en puertos de la UE a partir del 1 de enero 2018 tendrán que recopilar y posteriormente publicar datos anuales verificados sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y demás información pertinente, tales como la distancia, el tiempo en el mar, y la carga transportada, lo que permite determinar la eficiencia energética media de los barcos y presentar a la Comisión un informe de emisiones que contiene los datos agregados anuales verificados externamente, que pasarán a estar disponibles públicamente, todo ello sin necesidad de que enarbolen pabellones de la unión, sino simplemente que sus viajes se hagan desde o hasta puertos de la Unión Europea.

Durante la visita a los puertos de la UE, los buques deben llevar un documento de cumplimiento expedido por un verificador acreditado MRV. Esto podría ser objeto de inspecciones por parte de las autoridades de los Estados miembros.

Se estima que con el sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) se pueda reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta un 2% en comparación con una

situación convencional. Además, proporcionará una visión útil de la actuación de los buques, sus costos operativos asociados y el valor potencial de reventa. Esto beneficiará a los propietarios de buques que estará mejor equipado para tomar decisiones de inversión y obtener financiación.

## **4.2 REGULACIONES ESPECÍFICAS DE LOS EEUU Y CHINA**

Los Estados Unidos de América (USA) han adoptado el Anexo VI de MARPOL a través del título 40 del Código de Regulaciones Federales (CFR), parte 1043 para el control de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y las emisiones provenientes de los motores marinos y es aplicable a todos estados y a buques tanto nacionales como extranjeros que naveguen en aguas de los Estados Unidos. Se permite el uso de la tecnología de limpieza de gases de escape (EGC), pero no excluye la aplicación de los requisitos o prohibiciones adicionales por otras leyes o reglamento.

El Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong desde el 01/04/2014 introdujo una nueva regulación respecto al azufre, para todos los buques que arriben a sus puertos, debiendo de cambiar a un combustible con no más de 0.5% de azufre. El 04/12/2015 China estableció como zonas de control de emisiones el delta del río Yangtzé y el área de la Bahía Bohai Bay.

## **4.3 REGULACIÓN DE LA OMI**

Con el objetivo de establecer normas para la seguridad, la protección y conservación del medio ambiente, que sean cumplidas por todas las naciones dedicadas al transporte marítimo, varios países plantearon la necesidad de crear una organización encargada de dicha labor. Fue en el año 1948 en el marco de una Conferencia Internacional que tuvo lugar en Ginebra, que adoptó un convenio en el cual se creó formalmente la Organización Marítima internacional (OMI), llamada en aquel tiempo “Organización Consultiva Marítima Intergubernamental” (OCMI); como organismo especializado de las Naciones

Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y prevención de la contaminación del mar por los buques, en 1982 se cambió al nombre actual, OMI. El convenio constitutivo entro en vigor en 1958 y la nueva organización se reunió por primera vez el año siguiente.

Hoy en día las normas y medidas de la organización están firmemente arraigadas en la conciencia y en las practicas del sector marítimo y rigen prácticamente todas las facetas del sector, desde el proyecto, la construcción, los equipos y el funcionamiento de los buques hasta la formación de la gente de mar. La más importante de todas estas medidas fue la elaboración del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, conocido como MARPOL 73/78. Este convenio no solo comprende la contaminación accidental y operacional por hidrocarburos, sino también la contaminación causada por sustancias químicas, mercancías en bultos, aguas sucias, basura y la contaminación del aire.

Debido a la extensa red de reglas creadas por la OMI durante todos estos años, se puede afirmar con seguridad que, hoy en día, la navegación es un medio de transporte seguro y protegido, relativamente limpio y respetuoso con el medio ambiente. El transporte marítimo representa aproximadamente el 80% del transporte mundial de mercancías y constituye uno de los elementos esenciales de todo programa que tenga por objeto un crecimiento económico sostenible. La OMI trabaja constantemente en el fomento y desarrollo del transporte marítimo a través de herramientas como la eficiencia energética, nuevas tecnologías e innovación, educación y formación marítima para garantizar un sistema de transporte ecológico. En la actualidad la OMI cuenta con 171 estados miembros.

#### **4.3.1 EL CONVENIO MARPOL**

El Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, (MARPOL) es el principal instrumento de la OMI para prevenir la contaminación del medio marino provocado por los buques en cualquiera de sus variantes.

El Convenio MARPOL fue adoptado el 2 de noviembre de 1973 en la sede de la OMI, el organismo de las Naciones Unidas especializado en la seguridad de la



navegación y la prevención de la contaminación de los buques, pero no entro en vigor y fue absorbido por el Protocolo de 1978, en respuesta al gran número de accidentes de buques tanques ocurridos entre 1976 y 1977. El nuevo instrumento entro en vigor el 2 de octubre de 1983 (Anexos I y II).

El **Convenio MARPOL** ha sido objeto de diversas actualizaciones mediante la incorporación de enmiendas. Actualmente cuenta con seis anexos técnicos en los cuales figuran zonas especiales en las que se realizan controles estrictos respecto de descargas operacionales.

**Anexo I:** Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos.

**Anexo II:** Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel.

**Anexo III:** Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos.

**Anexo IV:** Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques.

**Anexo V:** Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques.

**Anexo VI:** Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques.

En el Anexo VI se establecen los límites de las emisiones de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno de los escapes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan el ozono; para las zonas de control de emisiones designadas se establecen normas más estrictas en relación con la emisión de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y de materia particulada.

#### 4.3.1.1 Anexo VI del Convenio MARPOL

En el Anexo VI del convenio MARPOL adoptado en 1997, se restringen los principales contaminantes atmosféricos contenidos en los gases de escape de los motores diésel de los buques, en particular los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas (PM), pero solo el SO<sub>x</sub> y el NO<sub>x</sub> están

sujetos a límites de emisiones cuantificadas, el PM también se incluye en el anexo VI, pero no se cuantifica. Hay estándares Industriales para las emisiones de partículas, pero estas no han sido adoptadas por la industria marina [3].

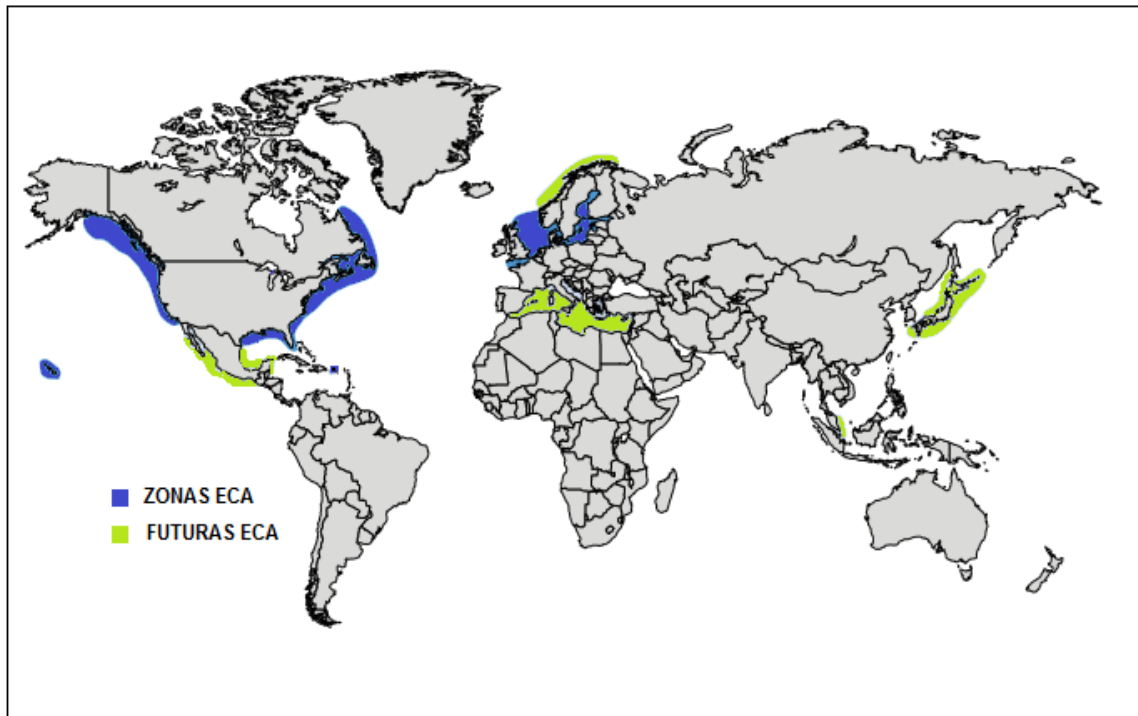
El Anexo VI del convenio MARPOL, entro en vigor el 19 de mayo del 2005. El Comité de protección del medio marino (MEPC), en su 53° periodo de secciones acordó revisarlo con el objetivo de reducir sensiblemente los límites máximos de emisión a partir de las mejoras tecnológicas existentes y la experiencia adquirida a través de su implantación. Tras tres años de pruebas el MEPC 58° (octubre del 2008) adopto el Anexo VI revisado y el código técnico conexo sobre los NO<sub>x</sub> 2008, que entro en vigor el 1 de julio del 2010.

#### 4.3.1.2 Zonas de Control de Emisiones

Los principales cambios del Anexo VI, son la reducción progresiva de las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> y PM a nivel mundial y la creación de zonas de control de emisiones (ECA) con el fin de reducir aún más las emisiones en las zonas marítimas designadas (Tabla 4.3.1.1 y Figura 4.3.1.1)

Zonas especiales	Adopción	Entrada en vigor	Con efecto desde
<b>Mar Báltico (SO<sub>x</sub>)</b>	26 septiembre 1997	19 mayo 2005	19 mayo 2006
<b>Mar del Norte (SO<sub>x</sub>)</b>	22 julio 2005 (Resolución MEPC. 132.(63))	22 Noviembre 2006	22 mayo 2007
<b>Norteamérica (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM)</b>	26 marzo 2010 (Resolución MEPC. 190(60))	1 agosto 2011	1 agosto 2012
<b>Mar Caribe de los Estados Unidos (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM)</b>	26 de julio (Resolución MEPC.202(62))	1 enero 2013	Barcos construidos después del 2015

**Tabla 4.3.1.2.1 - Zonas de control de emisiones, según MARPOL Anexo VI**



**Figura 4.3.1.2.1. - Zonas de Control de Emisiones según la OMI**

#### **4.3.1.3 Designación de las zonas de control de emisiones (ECA)**

Una propuesta para la designación de un área específica como la ECA tiene que ser presentado por Parte / las Partes en la OMI. Cuando dos o más Partes tienen un interés común en un área en particular, tienen que formular una propuesta coordinada. La propuesta tiene que incluir información específica tal como se establece en el documento MEPC 59-23-Add.1, apéndice III, como por ejemplo, una evaluación de las emisiones de los buques que operan en la zona propuesta y su impacto en la salud humana y el medio ambiente.

Para un área específica que será designado por la OMI como un ECA, Anexo VI del MARPOL tiene que ser modificado y el procedimiento de acuerdo tácito se aplica (Formación MARPOL, 2015):

- Enmiendas al Convenio MARPOL deben ser presentados al MEPC en menos 6 meses antes de su examen.

- Enmiendas serán adoptadas por una mayoría de dos tercios de sólo las Partes en el Convención presentes y votantes.
- Se considerará como enmienda aceptada al final de un período que habrá determinado en el momento de la adopción, que es no menos de 10 meses después de la fecha de adopción, a menos que antes de esa fecha, no menos de un tercio de las Partes, o aquellas Partes cuyas flotas mercantes combinadas representen como mínimo el 50 por ciento del tonelaje bruto de la flota mercante mundial, hayan comunicado a la Organización que rechazan las enmiendas.
- Una enmienda o un anexo entrarán en vigor 6 meses después de su aceptación.

#### **4.3.1.4 Regulación MARPOL sobre las emisiones de SO<sub>x</sub>**

Los barcos navegan cerca de la costa la mayor parte del tiempo, sus emisiones alcanzan cientos de kilómetros hacia el interior de la costa. El transporte de los contaminantes se realiza por el viento y puede variar según las condiciones meteorológicas. Los valores límites para los buques fuera de los puertos son por lo tanto importante también. Hay valores límites generales (globales) y especiales ECA. Los valores límites son establecidos por la OMI. En las zonas de control de emisiones (ECA), los buques deben de utilizar combustible con un contenido máximo de azufre del 0,1% o tener tecnología para la reducción de emisiones contaminantes la cual debe ser aprobada por la administración del pabellón y notificada a la OMI. Esto significa que un buque puede operar con combustibles con un contenido de azufre superior a la permitida por las regulaciones, siempre que las emisiones de SO<sub>x</sub> se controlen hasta un nivel que no sea superior a los niveles emitidos si se utiliza combustible reglamentario.

En el resto del mundo se reducirá del actual 3,50% al 0,5%, a partir del 1 de enero del 2020, y sujeto a un estudio de viabilidad en 2018, en relación con la disponibilidad del combustible reglamentario, pudiendo esta fecha postergarse hasta el 1 de enero de 2025.

En cuanto a la normativa europea para la regulación del valor límite de azufre en los combustibles marinos, según la directiva UE 1999/32/EC, Artículo 4, junto con las enmiendas para la normativa UE 2012/33/EC, el contenido de azufre en los combustibles marinos dentro de las aguas territoriales de un Estado miembro de la Unión Europea, no debe exceder del 0,1% en peso. Esto es aplicable a todos los buques, independientemente de su bandera. De esta forma, desde el 1 de enero de 2010 tampoco podrá exceder el 0,1% de contenido en azufre en los combustibles marinos ningún buque que esté en puerto con la excepción de que sea una estancia corta inferior a 2 horas.

SOX (%) GLOBAL	SO <sub>x</sub> (%) ZONAS DE CONTROL (ECA)
4,5% MASA ANTES DEL 1 ENERO DE 2012	1,50% MASA ANTES DEL 1 JULIO DE 2010
3,50% MASA A PARTIR DEL 1 ENERO DE 2012	1,0% MASA A PARTIR DEL 1 DE JULIO DE 2010
0,50% MASA A PARTIR DEL 1 ENERO DE 2012	0,1% MASA A PARTIR DEL 1 ENERO DEL 2015

Tabla 4.3.1.4.1 - Límite de emisiones de SO<sub>x</sub> según MARPOL VI

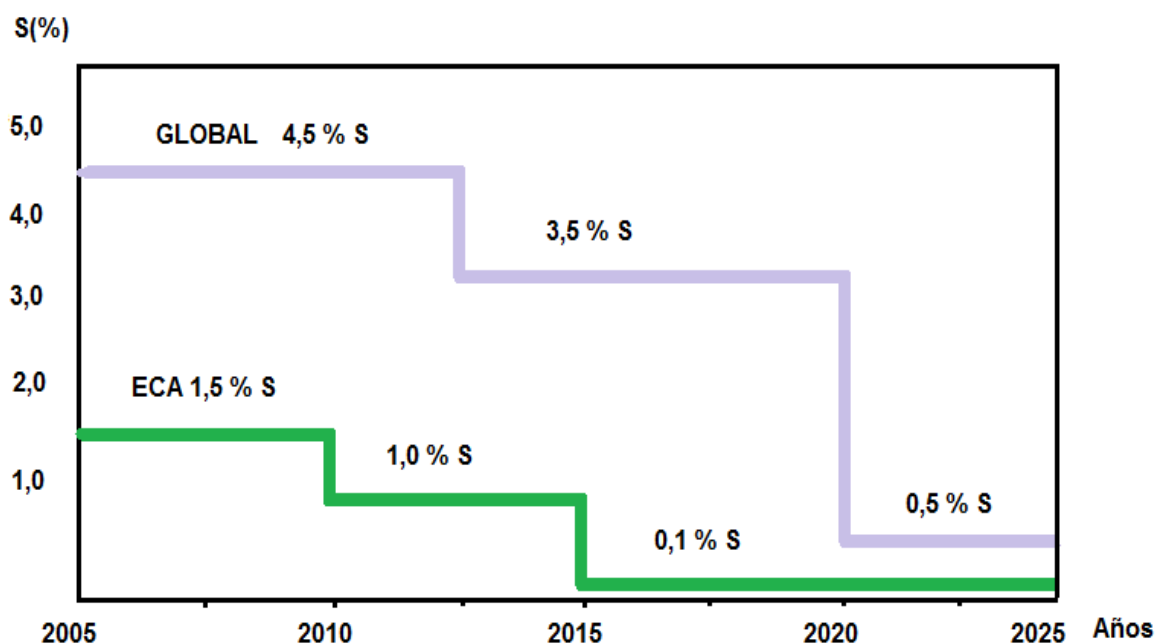


Figura 4.3.1.4.2 - Normas aplicadas por MARPOL VI para emisiones de SO<sub>x</sub>

Los controles de las emisiones de SO<sub>x</sub> y materia particulada se aplicará a los equipos de combustión interna que trabajen con todo tipo de combustible fósil, instalados a bordo tales como motores principales, motores auxiliares y calderas. Estos controles se realizarán tanto a los buques que naveguen dentro de las ECA, como fuera de ellas, por lo que tendrán que utilizar combustibles con el contenido de azufre correspondiente para cumplir con la normativa.

El primer nivel de control está relacionado con el contenido real de azufre declarado por el proveedor del combustible en la nota de entrega de combustible, la cual se vincula directamente con las prescripciones de calidad del combustible establecidas en la regla 18.

Los buques antes de entrar a una ECA deben de cambiar el consumo de combustible para cumplir con el 0,1% de contenido máximo de azufre, al tiempo que se plasmara por escrito todo el procedimiento realizado a bordo para el cambio de combustible en el libro de registro de hidrocarburos (se registrarán las cantidades de combustible reglamentario de la ECA de que se trate, así como la fecha, hora y situación del buque).

#### **4.3.1.5 Regulación MARPOL sobre las emisiones de NO<sub>x</sub>**

Los requisitos de control de NO<sub>x</sub>, de la OMI Anexo VI del MARPOL aplicable a los motores diésel marinos actuales de potencia de más de 130 kW, a parte de los que se utilizan exclusivamente para caso de emergencias, con independencia del tonelaje del buque en que se instalen estos motores. La OMI regula las emisiones de NO<sub>x</sub> por niveles, año de construcción del buque y velocidad nominal del motor. Los regímenes de niveles I y II se aplican a nivel mundial. El régimen del nivel I es aplicable a los buques construidos entre el 2000 y 2010, El nivel II a partir del 2011. El nivel III entro en vigor a partir del 2016, afectando las zonas ECA de América del Norte y Caribe (US). También deben de cumplir con el nivel III los nuevos buques construidos después del 1 enero del 2016. Fuera de las zonas de control (ECA-NO<sub>x</sub>) se aplicará el nivel II.

NIVEL	FECHA DE CONSTRUCCION DEL BUQUE	TOTAL DE DIMENSIONES DE NO <sub>x</sub> (G/KW/H) N=RPM		
		N<130	130<N<1999	N≥2000
I	1 DE ENERO DE 2000	17,0	$45 \cdot N^{(-0,2)}$ Por Ejemplo 720 RPM = 12,1	9,8
II	1 DE ENERO DE 2011	14,4	$44 \cdot N^{(-0,23)}$ Por Ejemplo 720 RPM = 9,7	7,7
III	1 DE ENERO DE 2016	3,4	$9 \cdot N^{(-0,2)}$ Por Ejemplo 720 RPM = 2,4	2,0

Tabla 4.3.1.4.2 - Límite de emisiones de NO<sub>x</sub> según MARPOL VI

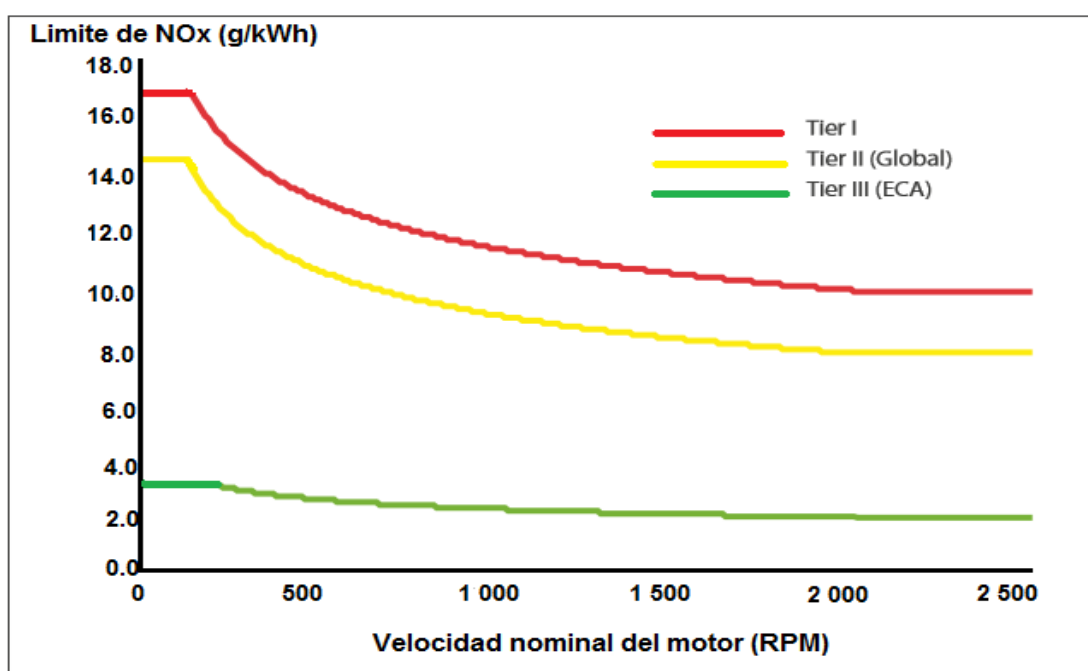


Figura 4.3.1.4.3 - Normas aplicadas por MARPOL VI para emisiones de SO<sub>x</sub>

El control de las emisiones de NO<sub>x</sub> se lleva a cabo mediante el cumplimiento de las prescripciones de reconocimiento y certificación que conducen a la expedición del Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores (EIAPP). Los motores que utilizan gasolina, propano o gas natural no requieren de este certificado.

El certificado EIAPP es un documento aceptado internacionalmente en el que se especifica que el motor cumple con los límites de emisiones de NO<sub>x</sub>, establecidos por MARPOL anexo VI en su regla 13. Este certificado debe ser

aprobado, por el Estado de abanderamiento del buque en que se va instalar, o en nombre de éste, a organizaciones reconocidas (Sociedades de Clasificación).

Los motores diésel que requieren ser certificados para que cumplan la normativa respecto a límites emisiones NO<sub>x</sub> son:

- Los motores con más de 130 kW instalados en buques construidos después del 1 de enero del 2000.
- Un motor con más de 130 kW, instalado en cualquier buque, si el motor ha sido objeto de una transformación importante a partir del 01-01-2000.
- Si se ha incrementado la potencia del motor un 10%.
- Si el motor se ha modificado de manera significativa, lo que significaría que aumentaría sus emisiones de NO<sub>x</sub> (por ejemplo, la sustitución de las boquillas de los inyectores, cambio de turbocompresor, etc.).

Los motores diésel marinos instalados en yates y otras embarcaciones pequeñas no están exentos de los límites de emisiones nivel III al menos que cumplan con las siguientes características:

- La eslora del buque (tal como se define en el Reglamento 1.19 del Anexo I del Convenio MARPOL) es inferior a 24 m, y se ha diseñado específicamente, y se utiliza únicamente, con fines recreativos.
- La placa de identificación del motor de potencia de propulsión combinada es inferior a 750 kW y la Administración de la bandera está de acuerdo en que el buque no puede cumplir con el nivel III estándar debido a limitaciones de diseño o construcción.
- El motor está instalado en un buque construido con anterioridad al 1 de enero 2021 y de arqueo bruto inferior a 500, con una eslora igual o superior a 24 m y que estén específicamente proyectado y utilizado exclusivamente, para fines recreativos.

Los motores diésel que no requieren certificado EIAPP son:

- Los motores que van a ser usados solamente en caso de emergencia, como generador de emergencia y motores de botes salvavidas.



Cada motor diésel certificado respecto a las  $\text{NO}_x$  debe llevar a bordo un expediente técnico. Este documento es preparado por el fabricante del motor y contiene la información básica para inspeccionar el motor para verificar si cumple con la normativa en el que figurara los parámetros principales de trabajo del motor, el régimen, ajustes, cambios y valores críticos de funcionamiento del motor en relación con los  $\text{NO}_x$ . Esta información es utilizada en las inspecciones para asegurarse que el motor ha estado cumpliendo con los límites de  $\text{NO}_x$ . El armador debe asegurarse que toda la información plasmada en el documento coincida con la realidad del motor, de no ser así, el inspector puede incluir una investigación exhaustiva a bordo para medir las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

#### **4.3.1.6 Regulación MARPOL para disminuir las emisiones de $\text{CO}_2$**

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un producto inevitable de la combustión, de cualquier combustible que contenga carbono, es decir combustibles fósiles, excepto la mayoría de formas de gas natural licuado (LNG). El único medio de reducir el  $\text{CO}_2$  es quemar menos combustible fósil, que es la intención de las regulaciones de eficiencias desarrolladas por la OMI.

En 2011 la OMI adoptó una serie de medidas técnicas y operacionales obligatorias en materia de eficiencia energética, las cuales se espera que reduzcan significativamente las emisiones de  $\text{CO}_2$  procedentes del transporte marítimo internacional. Estas medidas de carácter obligatorio son el índice de Eficiencia Energética de Diseño (EEDI) y el Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) entraron en vigor el 1 de enero de 2013.

El índice de eficiencia energética de proyecto EEDI para los buques nuevos es la medida técnica más importante encaminada a promover el uso de equipos y maquinarias con mayor eficiencia energética. El SEEMP permite a los armadores u operadores de buques, medir la eficiencia del combustible de los buques existentes y poder controlar los efectos de cualquier cambio en operaciones.

#### **4.3.2 Seguimiento y control de las emisiones**

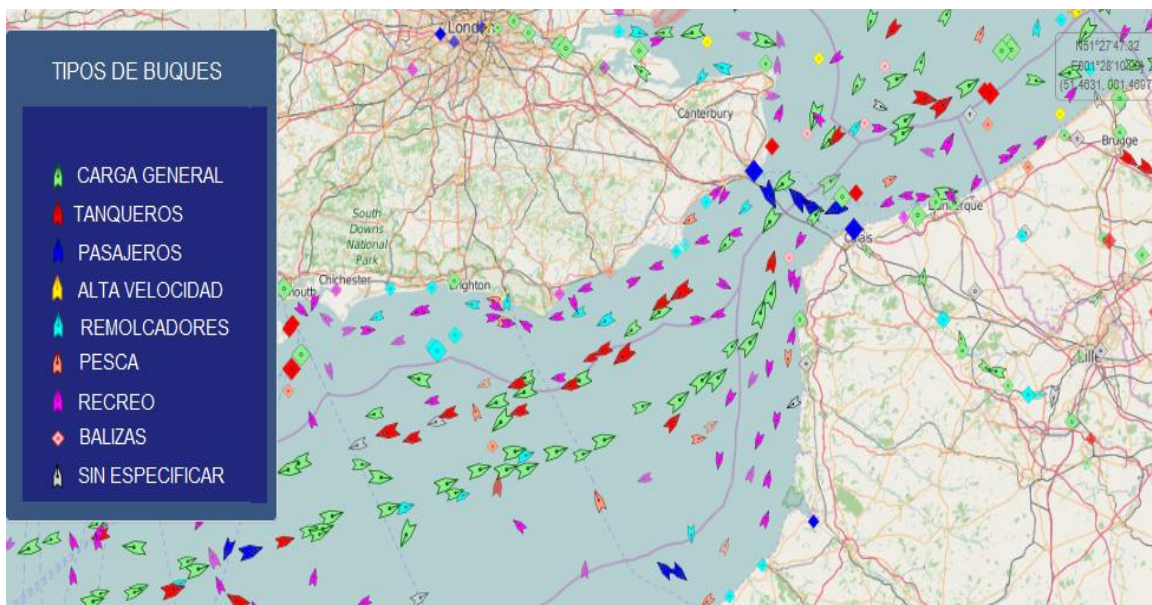
Hay diferentes maneras de obtener información sobre los movimientos de los barcos y el consumo de combustible. En primer lugar, los armadores necesitan saber la cantidad de combustible que se consume por el coste del mismo. En segundo lugar, con el fin de entender el presente y futuro potencial impacto medioambiental de los buques, como la cantidad, tipo, y la ubicación de las emisiones de contaminantes del aire y gases de efecto invernadero a la atmosfera deben ser cuantificados. En tercer lugar, con el fin de proponer políticas ambientales o para monitorear el cumplimiento de las normativas en vigor.

Los sistemas más importantes utilizados son, el Sistema de Identificación Automática (AIS), Sistema Automatizado de Asistencia Mutua para el Salvamento de Buques (AMVER), Base de Datos sobre las Condiciones Meteorológicas en los Océanos (ICOADS), Sistema de Identificación y Seguimiento de Largo Alcance (LRIT), estadísticas de ventas de combustible, la información a bordo de los buques, y las estadísticas del puerto. Para medir las emisiones directamente se utilizan aviones o helicópteros a través del sistema LIDAR, la EMSA tiene como propósito utilizar drones con esta tecnología para vigilar las emisiones de los buques en las ECA.

El medio que más datos e información ofrece sobre los movimientos de los barcos es el AIS. El AIS se desarrolló para evitar colisiones y para ayudar a las autoridades portuarias para el control del tráfico marítimo. OMI ha adoptado un Reglamento (Regla 19 del Capítulo V del Convenio SOLAS) que requiere que los AIS deben ser instalado en todos los buques mayores de 300 GT que efectúan viajes internacionales, los buques de carga de más de 500 GT que realizan viajes nacionales y todos los buques de pasaje.

El transpondedor AIS instalado en los barcos incluye un sistema de posicionamiento global (GPS), que recoge la posición, velocidad y rumbo. También incluye transmisores (VHF), que transmiten periódicamente información del GPS y la información sobre el buque (como el nombre del buque, número

OMI, bandera, eslora, el calado, el destino y la hora estimada de llegada). En la actualidad, aproximadamente 72,000 buques están equipados con AIS. Con los datos de posición, la velocidad puede ser instantáneamente calculada, proporcionando una buena estimación de la potencia entregada por el motor, que se puede procesar adicionalmente en el cálculo de emisiones. En las zonas costeras, los mensajes AIS son capturados por las estaciones de tierra, mientras que los mensajes enviados en los océanos son capturados por satélites. Ejemplo del uso del AIS se puede apreciar en la figura 4.3.1.7.1, donde se puede ver en tiempo real todos los datos identificativos de los buques.



**Figura 4.3.2.1 - Tráfico real por el Canal de La Mancha (el 31/07/2016 a las 14:00 horas).**

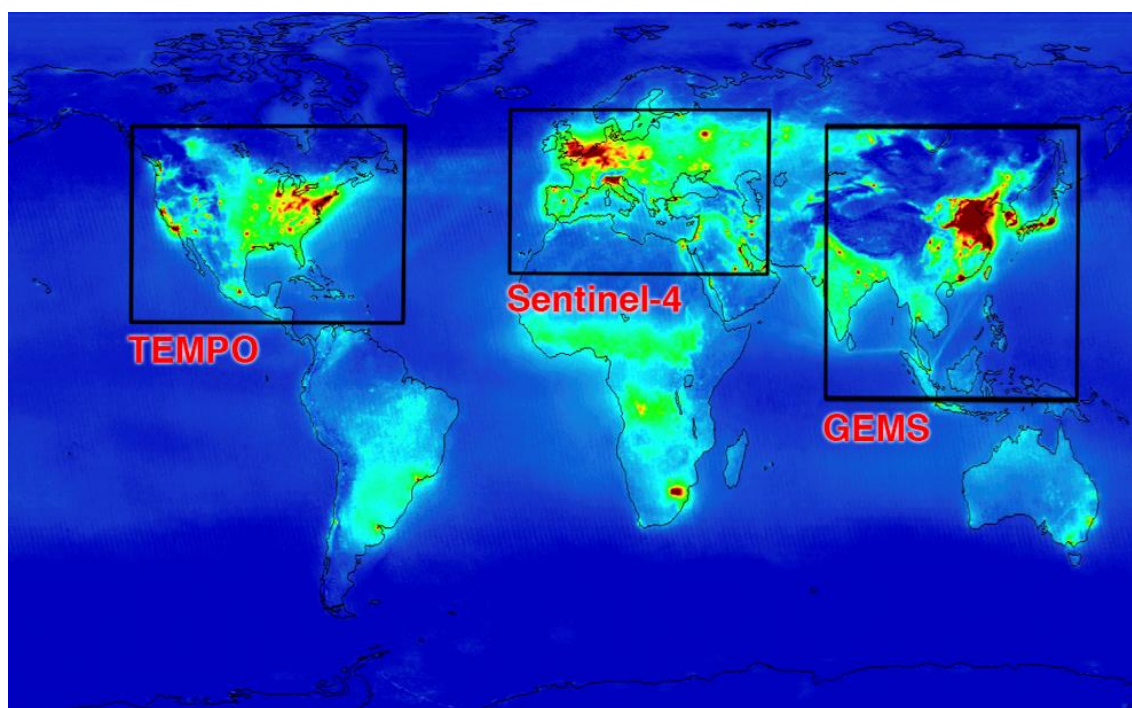
Fuente: <https://www.marinetraffic.com/es/>

El sistema LIDAR, o escaneo láser 3D, fue concebido en la década de 1960 para la detección de submarinos de los aviones y los primeros modelos se utilizaron con éxito en la década de 1970 en los EE.UU., Canadá y Australia. La mayoría de los sistemas LIDAR aerotransportados están formados por el sensor LIDAR, un receptor GPS, una unidad de medición inercial (IMU), un ordenador y los dispositivos a bordo de almacenamiento de datos.

El sistema LIDAR emite un haz de láser sobre un espejo y lo proyecta hacia abajo desde una plataforma en el aire, por lo general un avión, o un helicóptero. El haz escanea de lado a lado cuando el avión vuela sobre el área de estudio.

que miden entre 20.000 y 150.000 puntos por segundo. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. En el sensor LIDAR se acumula una gran cantidad de datos y una sola pasada puede generar fácilmente miles de millones de puntos de un total de varios terabytes.

El LIDAR tiene una capacidad única para detectar partículas en el agua y el aire. Utiliza longitudes de onda cortas de la luz en el espectro visible, por lo general ultravioleta, visible o infrarrojo cercano, es posible la imagen de un objeto o característica sólo aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda o más grande. Esto hace que sea especialmente sensible a los aerosoles, partículas de las nubes y las moléculas de aire. Los contaminantes tales como dióxido de carbono, dióxido de azufre y el metano son todos detectables con LIDAR.



**Figura 4.3.2.2 - Futuro proyecto de monitoreo de la NASA**

Fuente: <http://www.nasa.gov/feature/langley/the-future-of-monitoring-air-quality-from-space>

También existen proyectos futuros desarrollados por la NASA para vigilar los signos vitales de la tierra, con una flota de satélites, así como campañas de observación en el aire y en la tierra, compartiendo el conocimiento con toda la

comunidad global e instituciones para contribuir a la comprensión y protección de nuestro planeta, (Figura 4.3.1.7.2). La NASA prevé lanzar el satélite TEMPO, capaz de realizar mediciones exactas de los contaminantes en la troposfera, en concreto de ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y aerosoles, que proporcionaran imágenes con alta resolución para una visión completa de las fuentes de contaminación, así como la influencia en la calidad del aire a escala local y global, en conjunto con los europeos (Centinel 4) y asiático (GEMS).

#### 4.3.2.1 Sanciones y multas en las zonas ECA de EU

En varios países se han iniciado procedimientos legales contra infractores graves. Debido a que esta es una nueva área en la jurisdicción en la mayoría de los países, las autoridades nacionales tienen que reunir toda la información necesaria y pertinente sobre los nuevos aspectos jurídicos.

Las sanciones y multas por el incumplimiento de la directiva 2012/33/UE, son diferentes para los estados miembros de la UE. Algunos emplean multas administrativas mientras que otros países utilizan sanciones penales.  
<http://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/nabu-seca-studie2016.pdf>.

Países	Sanciones por incumplimiento	Administrativa / Criminal
Germany	€ 350-25,000	Criminal
Finland	max. € 800,000	Criminal
Latvia	€ 350-1,400	Administrativa
Lithuania	max. 14,500	Administrativa
Estonia	€ 32,000	Administrativa
Norway	max. NOK 300,000	
Sweden	max. SEK 10 million	Criminal
Poland	max. € 57,000	Administrativa
UK	£ 8,000-3 million	Criminal
Netherlands	max. € 800,000	Criminal
Belgium	max. € 6,000,000	Criminal
France	max. € 200,000	Criminal

**Tabla 4.3.2.1.1 - Multas por país en caso de no cumplimiento**

Fuente: [www.helcom.fi](http://www.helcom.fi)

También los estados miembro pueden solicitar la detención del buque, en caso de incumplimiento que podría costar entre 10.000 y 50.000 euros por días, hasta que el buque no solvante la situación. Solo podrá salir del puerto después de realizar la toma del combustible reglamentario y realice la conmutación. En la figura 4.3.2.1.1 se muestran la gran diferencia entre las multas aplicadas, por las diferentes administraciones de los países con zonas ECA europeas.

#### **4.3.2.2 Sanciones y multas en las zonas ECA de China**

El componente de gravedad para grabar violaciones de mantenimiento es de 2.500 US\$ a 15.000 US\$ por día, dependiendo de la gravedad. En general, la primera violación estaría sujeta al extremo inferior del rango, mientras que una empresa que ha violado las disposiciones en más de una ocasión en el pasado estaría sujeta a la parte alta de la gama. La gravedad (y por lo tanto el tamaño de la pena) también aumenta con la extensión de la información que falta, la desorganización de la información, la importancia de la información que falta para entender emisiones de los buques, y la evaluación del cumplimiento.

Una violación previa de la misma empresa, ya sea en calidad de propietario u operador puede aumentar el importe de la gravedad hasta un 30%. Dos o más violaciones anteriores por el mismo buque o misma empresa, ya sea en calidad de propietario u operador pueden aumentar el importe de la gravedad hasta en un 70%. El West P&I Club ha anunciado que la Administración de Seguridad Marítima de China (MSA) ha formulado directrices sobre lo que los oficiales de MSA son a buscar al comprobar el cumplimiento de los barcos con los requisitos de la ECA chinas.

Las penas impuestas podrían ser una advertencia, una rectificación de la violación, la detención del buque o de la imposición de sanciones financieras. Multa impuesta en virtud del artículo 106 de la Ley de la República Popular de China (RPC) para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica puede variar de 1.500 US\$ a 15.000 US\$, en virtud del artículo 63 del Reglamento sobre la Administración de la Prevención y Control de Contaminación del medio marino causada por los buques.

## **5 LA PROPULSIÓN DIESEL EN BUQUES MERCANTES**

### **5.1 CLASIFICACIÓN DE LA FLOTA MERCANTE MUNDIAL**

Según las reglas de las Sociedades de Clasificación de buques, se define como buque a una unidad flotante destinada para el servicio de navegación marítima con una longitud superior a 12 metros y con GT mayor que 15, o que transporte más de 12 pasajeros. La presente definición no se aplica a los buques de guerra ni transporte de tropas. Los buques oceánicos marinos son generalmente grandes barcos diseñados para la navegación en aguas profundas.

En enero de 2015, había 50.420 barcos registrados en flotas mercantes del mundo. La mayoría de los buques se pueden clasificar en: buques tanque, buques graneleros, buque portacontenedores, buques ro-ro, buques de carga general, buques frigoríficos y los buques de pasaje.

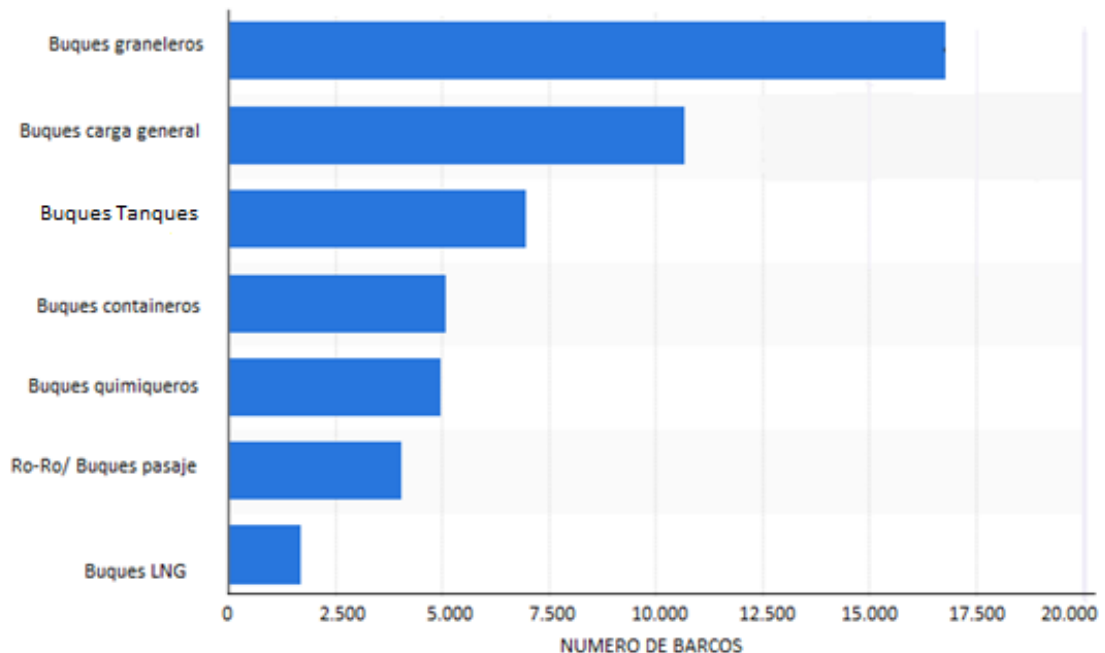
Los buques graneleros están destinados al transporte de graneles sólidos como el carbón y granos y se clasifican como el tipo más común de barco de la flota mercante mundial, lo que representa alrededor de un tercio de la flota. La voluntad de aceptar los barcos más grandes por su gran capacidad de carga sigue siendo alta en la industria. Los buques graneleros tienen una capacidad combinada de alrededor de 705 millones de toneladas de peso muerto en 2014, más del doble del volumen de capacidad de los buques portacontenedores, que llegó a alrededor de 216 millones de toneladas de peso muerto.

Como su nombre indica, buques de carga general son buques polivalentes, y llevan una gama de productos y mercancías. Los buques de carga general se clasifican como el segundo tipo más común de buque en el mundo, representando más del 20 por ciento de la flota mercante mundial. A partir de enero de 2015, el número de buques de carga se situó en torno a 11.000.

Los buques tanque de petróleo crudo y portacontenedores son el tercer y cuarto tipos más comunes, con casi el 14 y el 10 por ciento de la cuota, respectivamente. El número de los petroleros para crudos redondea a cerca de 7.000 unidades, mientras que el número de buques de portacontenedores de



carga en el mundo estaba en alrededor de 5.000 unidades en el comienzo de 2015 (figura 5.1.1).



**Figura 5.1.1 - Cantidad de buques por tipos.**

Fuente: <http://www.statista.com/statistics/264024/number-of-merchant-ships-worldwide-by-type/>

Aunque también existe la propulsión por turbina de gas, en el grueso de los buques mencionados, el motor diésel es el más utilizado desde hace décadas. La turbina de vapor se utilizó mucho en petroleros y buques de transporte de gas debido a que eran los únicos en soportar su elevado consumo específico. Algunos buques de pasaje también la utilizaron por su baja rumorosidad y escasas vibraciones.

El número de empresas que diseñan y construyen los motores de la mayor parte de los buques mencionados se ha reducido a lo largo de los años debido a la falta de créditos, fusiones y cierres. Empresas que siguen en los negocios son MAN B&W (formado por la fusión de los dos gigantes de la industria), Wärtsilä Corporation (antes Wärtsilä-NSD) que diseñan y construyen los motores Sulzer y



Mitsubishi Heavy Industries (MHI) en Japón también diseña y construye su propio motor de dos tiempos, el UE.

Debido a la longevidad de estos motores y el profesionalismo de los ingenieros marinos a cargo de ellos, todavía hay barcos que navegan por el mundo impulsado por motores que ya no se construyen. Doxford, Gotaverken, Fiat son nombres que pueden traer a la memoria, así como los diseños más antiguos de Burmeister & Wain, Sulzer, y MAN.

Hoy en día los que se mantienen y dominan el mercado son: MAN D&T, Wärtsilä, Mitsubishi Heavy Industries, MAK (CAT), Rolls-Royce, HiMSEN y Yanmar.

## **5.2 EL MOTOR DIÉSEL MARINO**

Hace más de 120 años el ingeniero alemán Rudolf Diesel publicó un folleto de 96 páginas con el título “Teoría y Proyecto de un Motor Térmico Racional”, destinado a remplazar la máquina de vapor, en que exponía el funcionamiento de una nueva máquina motriz original donde, sin necesidad de otras transformaciones, convertía el calor en trabajo, inyectando directamente el combustible en el interior del cilindro con un alto grado de rendimiento y ahorro de aparatos anexos. Rudolf Diesel construyó su primer prototipo conocido del motor de alta compresión en 1897. Desde ese momento, el motor diésel se ha convertido en una de las formas más potentes y fiables del mundo de la generación de energía.

Desde su creación se han hecho grandes avances y progresos tanto en las mejoras en su rendimiento como en sus componentes y materiales.

Los motores diésel pertenecen al género de los motores térmicos, en los cuales la energía química del combustible se transforma en energía térmica directamente dentro del cilindro. El aire que entra al cilindro junto con el combustible inyectado forman la mezcla de trabajo que se auto inflama gracias a la alta temperatura que se obtiene al final del proceso de la compresión, así

como también a la reacción química del combustible con el oxígeno del aire. Como resultado del proceso de combustión en el interior del cilindro se forman productos gaseosos con alta temperatura y presión. La efectividad del proceso de la combustión se caracteriza por la cantidad de calor que se desprende dentro del volumen del cilindro del trabajo.

La transformación de la energía térmica obtenida en energía mecánica, se efectúa mediante la transmisión del trabajo de la expansión de los productos de combustión al pistón, cuyo movimiento alternativo a su vez se transforma a través del mecanismo biela-manivela en movimiento giratorio en el eje cigüeñal del motor. El momento de torsión creado en el cigüeñal realiza un trabajo útil al vencer la resistencia de una carga exterior, por ejemplo la hélice de un buque.

### 5.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DIÉSEL MARINOS

Los motores instalados en los buques de diferentes tipos se pueden clasificar en base a las siguientes características:

1. Según el **número de carreras** necesarias para la realización del ciclo de trabajo (característica principal de los motores):

- De cuatro tiempos.
- De dos tiempos.

Por tiempo se sobreentiende la parte de ciclo de trabajo en el cual el pistón realiza una carrera (recorrido) entre los puntos correspondientes de los valores volumen mínimo hasta el volumen máximo o a la inversa, los cuales se denominan punto muerto superior (P.M.S) y punto muerto inferior (P.M.I).

2. Según su **construcción**:

- Motores de tronco: aquéllos en los cuales la guía del pistón es la falda del mismo.

- Motores de cruceta: aquéllos en los cuales la guía del pistón la constituyen los patines que se desplazan por las guías paralelas.

3. Según la **configuración de los cilindros**:

- En línea.
- En V.

4. Según la **velocidad de giro** del eje de cigüeñales (rpm):

- Motores de bajas revoluciones entre 100 y 350.
- Motores de medias revoluciones entre 350 y 750.
- Motores de altas revoluciones entre 750 y 2500.

Estas serían las formas más comunes de clasificar la mayor parte de los motores pero es necesario mencionar que han existido de doble efecto, de émbolos opuestos y, rara vez, con la disposición de cilindros radial (Zvezda).

Por lo general, la velocidad va asociada al tipo de ciclo realizado de manera que los motores lentos

### 5.2.2 MOTORES DE DOS TIEMPOS

Los motores de baja velocidad son por lo general los motores de dos tiempos con grandes desplazamientos de hasta 3 m<sup>3</sup>/cilindro y se utilizan para la propulsión de buques graneleros, portacontenedores, buques cisterna de mayor tamaño, carga general y algunos buques roll-on/roll-off. Por lo general son turboalimentados con posenfriamiento y tienen entre una (lentos) y cuatro (semilentos) válvulas de escape por cilindro.

El aire de barrido entra en el cilindro a través de una serie de orificios de admisión dispuestos alrededor de la parte inferior del cilindro llamados

lumbreras. La admisión se controla por el pistón, ya que destapa o cubre los puertos de admisión. La inyección de combustible es típicamente mecánica con 3 inyectores por cilindro. Aunque en los últimos años se está implantando la inyección electrónica por sus ventajas. Por lo general tienen de 4 a 20 cilindros.

Como su nombre indica el ciclo de trabajo de un motor de dos tiempos consiste en dos carreras es decir, un ciclo de potencia por cada dos carreras del pistón (o por una revolución). La carrera del pistón hacia abajo es la carrera de expansión y produce el trabajo. En la parte inferior de la carrera de los gases de escape son expulsados fuera del cilindro y se sustituye por aire de carga fresca por el proceso de barrido.

La inyección se lleva a cabo en torno a 10-20 ° antes del PMS y la combustión tiene una duración de 30-50 °. A unos 110-120 ° después del PMS las válvulas de escape se abren o los orificios de escape (lumbreras) son descubiertos por el pistón. Los orificios de entrada se abren alrededor de 20-30 ° después. Los orificios de entrada serán cerrados algunos grados después de BDC al abrir antes de ella y la compresión del aire en el cilindro comienza de nuevo. La carrera ascendente es la carrera de compresión que comprime el aire en el cilindro antes de la ignición.

### **5.2.3 MOTORES DE CUATRO TIEMPOS**

Los motores de velocidad media suelen ser motores de cuatro tiempos con cilindrada significativamente menor (30 a 200 dm<sup>3</sup>/cilindro) que los motores de baja velocidad. Se suelen utilizar como motores de propulsión de buques más pequeños, carga general, buques roll-on / roll-off, ferris, cruceros, y los motores como auxiliares de los buques de gran tamaño para la generación de energía o refrigeración. Comúnmente son sobrealimentados con pos enfriamiento y tienen dos válvulas de admisión y dos válvulas de escape por cilindro y se inyecta mecánicamente con un inyector por cilindro. Por lo general tienen de 6 a 18 cilindros.

## **6 COMBUSTIBLES UTILIZADOS SECTOR MARINO**

Todo el combustible marino utilizado en la actualidad se crea a partir del mismo proceso de destilación básica que crea otros hidrocarburos líquidos como gasolina de motor, combustible para calefacción y el queroseno. Combustibles marinos destilados son comparables a otras formas de líquidos hidrocarbonados destilados, como el combustible diésel usado en carreteras o combustible No.2, en que tienen propiedades químicas similares y límites de especificación. Combustibles marinos residuales, también llamados aceites intermedio de combustible (IFO) o de fuelóleo pesado (HFO), se componen de hidrocarburos pesados, residuo que se crean como un subproducto durante la refinación de petróleo, y pueden contener diversos contaminantes tales como metales pesados, agua, y niveles altos de azufre. Estos contaminantes pueden dañar los motores y líneas de distribución de combustible y equipos, por lo tanto, el combustible residual es tratado para eliminar estos inconvenientes a través de filtros y depuradoras antes de la combustión en el motor marino.

Ambos combustibles marinos residuales y destilados están obligados a cumplir con las especificaciones internacionales de los combustibles establecidos en la Organización Internacional de Normalización (ISO) 8217.

### **6.1 COMBUSTIBLES RESIDUALES PARA USO MARINO**

El combustible residual marino se crea a través de la refinación de petróleo tradicional como un producto de residuo del proceso de refinación. Típicamente, este combustible es más bien denso y viscoso, y que tiende a contener metales pesados y otros contaminantes normalmente contenidos en el petróleo crudo. El combustible residual se clasifica por la viscosidad del combustible a una temperatura de referencia establecida y hay varias categorías de este tipo de combustible; sin embargo, el combustible más utilizado en la industria del transporte marino es aceite combustible intermedio IFO 180 e IFO 380 donde el número indica la máxima viscosidad en centistokes (cSt) a 50 ° C. Según la

norma ISO 8217, el combustible de más alta viscosidad es HFO 700. A pesar de que muchos barcos han diseñado sistemas de combustible para operar hasta esta viscosidad, se utiliza raramente. Para cada clase de viscosidad del combustible, existen subcategorías de normas ISO, tales como RME 180, RMF 180 y RMH 380, RMK 380, etc. Los combustibles con un número menor última tienen menor viscosidad y por lo general menos impurezas (por lo general cuestan más). El contenido de azufre en el IFO 180 y 380 combustibles se limita actualmente a 3,5 por ciento según Anexo VI del MARPOL y este límite se reducirá progresivamente a nivel mundial, hasta el 0,5 por ciento para el 2020 o 2025 por las reducciones requeridas en el anexo VI.

## **6.2 COMBUSTIBLES DESTILADOS PARA USO MARINO**

EL combustible destilado marítimo se divide en cuatro tipos de combustible distintos: DMX, DMA, DMB y DMC; sin embargo, sólo dos de estos combustibles se utilizan comúnmente en la industria del transporte marítimo. El DMX es un hidrocarburo de azufre muy bajo de destilados medios, y por lo tanto es bastante caro en comparación con otros combustibles destilados. Este tipo de destilado se utiliza principalmente a bordo de buques para ser usado en motores de emergencia por ejemplo botes de rescate. Los siguientes dos tipos de combustible destilado, DMA y DMB, también se llaman gasóleo para uso marítimo MGO y diésel oíl marino MDO, respectivamente. Estos dos combustibles destilados constituyen la mayoría de los combustibles destilados marítimos vendidos. El DMC no es muy usado porque tiene mayor densidad y más impurezas.

## **6.3 REQUISITOS DE LOS COMBUSTIBLES PARA USO MARINO**

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) existe desde 1987. El propósito declarado de la norma ISO 8217 es definir los requisitos para los combustibles derivados del petróleo para uso en motores diésel marinos y

calderas previo a un tratamiento adecuado antes de su uso, y se proporciona con la orientación de las partes interesadas tales como los diseñadores de equipos marinos, proveedores y compradores de los combustibles marinos. Estas especificaciones se revisan regularmente para adaptarse a los cambios en la tecnología de los motores diésel marinos, los procesos de refinación de petróleo crudo y de la evolución del medio ambiente.

Características	Unidad	Limit	DMA	DMZ	DMB	RMA 10	RMB 30	RMD 80
Densidad a 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	Max	890	890	900	920	960	975
Viscosidad a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s (cSt)	Min	2.00	3.00	2.00	-	-	-
		Max	6.0	6.0	11.0	-	-	-
Viscosidad a 50 °C	mm <sup>2</sup> /s (cSt)	Max	-	-	-	10.0	30.0	80.0
Sulfuros	% m/m	Max	1.50	1.50	2.00	Max 0.1% en ECA		
Punto inflamación	°C	Min	60	60	60	60	60	60
Punto de fluidez	°C	Max	-6.0	-6.0	0.0	0	0	30
Índice de acidez	mg KOH/g	Max	0.5	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5
AL+Si	ppm m/m	Max	-	-	-	25	40	40
Lubricidad	µm	Max	520	520	520	-	-	-

**Tabla. 6.3.1 Características de los combustibles marinos, según norma ISO 8217 / 2012.**

Principales características de los combustibles para uso marino son:

#### **a) Densidad**

La unidad oficial es el kg/m<sup>3</sup> a 15 °C, mientras kg/l a 15 °C es la unidad más utilizada. La densidad se utiliza para calcular la cantidad de combustible suministrado. La densidad da una indicación de la calidad de ignición del

combustible dentro de una cierta clase de producto. Este es particularmente el caso de los IFO de baja viscosidad. La densidad del producto es importante para la purificación a bordo del combustible; cuanto mayor es la densidad, mayor dificultad a la hora de depurarlo.

### **b) Viscosidad**

La viscosidad del combustible constituye la característica más importante del combustible, la misma determina la calidad de la pulverización, el carácter y el chorro del combustible inyectado y su fluidez por las tuberías. Por viscosidad se sobreentiende la propiedad del líquido de ofrecer resistencia al desplazamiento de sus moléculas, bajo la acción de una fuerza exterior. A través de los años, se han utilizado diferentes unidades para la viscosidad (grados Engler, Segundos Saybolt Universal, Segundos Saybolt Furol y Redwood Nº 1). La mayoría de los combustibles marinos hoy en día, utilizan la viscosidad medida en centiStokes ( $1\text{cSt} = 1\text{ mm}^2/\text{s}$ ). Al citar una viscosidad debe ir acompañada de la temperatura a la que se determina. Las temperaturas aprobadas para la determinación de la viscosidad de los combustibles marinos son 40 °C para combustibles destilados y para residuales 50 °C.

### **c) Índice de acidez**

Todos los combustibles tienen un índice de acidez de origen natural, sin embargo combustibles con altos índices de acidez derivados de compuestos ácidos pueden causar daños acelerados en los grandes motores diésel, especialmente en el equipo de inyección de combustible. Sin embargo, los combustibles fabricados a partir de los crudos nafténicos pueden tener un índice de acidez superior al máximo especificado en la norma ISO 8217: 2012, pero aun así son aceptable para su uso. Actualmente no existe una correlación definida entre el índice de acidez de un combustible y su corrosividad.

### **d) Cenizas**

El contenido de cenizas es una medida de los metales presentes en el combustible, ya sea como inherente al combustible o como contaminación.



**e) Residuo de carbono**

Residuo de carbono se determina por una prueba de laboratorio que se realiza bajo el suministro de aire reducido específico. No representa las condiciones de combustión en un motor. Da una indicación de la cantidad de hidrocarburos en el combustible que tienen características de combustión difíciles, pero no existe una correlación concluyente entre las cifras de residuos de carbono y la experiencia de campo real. El método de micro residuos de carbón se especifica en la norma ISO 8217.

**f) Finos catalíticos**

Aceite de ciclo pesado se utiliza en todo el mundo en la refinación compleja como componente de mezcla de combustible pesado. Partículas de catalizador dañadas mecánicamente (silicato de aluminio) no pueden eliminarse por completo de una manera rentable, y se encuentran en el combustible pesado mezclado. La limpieza previa del combustible a bordo de los barcos tiene una eficacia de eliminación de aproximadamente el 80% de los finos catalíticos. Con el fin de evitar el desgaste abrasivo de las bombas de combustible, inyectores y camisas de cilindros del límite máximo de silicato de aluminio se define en la norma ISO 8217: 2012 el máximo recomendado es de 60 mg / kg para combustible tipo RMK.

**g) CCAI**

El Índice Calculado de Aromaticidad del Carbono (CCAI) sólo es aplicable a fueloil residual y proporciona una indicación del retardo en la ignición de un combustible. El CCAI se calcula a partir de la densidad y viscosidad de un aceite combustible residual. Algunos fabricantes de motores especifican los límites CCAI para sus motores, dependiendo del tipo de motor y la aplicación.

**h) Índice de cetano**

Índice de cetano sólo es aplicable para gasóleo y combustibles destilados. Es una medida de la calidad de ignición del combustible en un motor diésel. El

numero o índice de cetano tiene relación con el tiempo que transcurre entre la inyección de combustible y el inicio de la combustión (intervalo de encendido). Cuanto mayor sea el número de revoluciones del motor, mayor será el índice de cetano necesario para una rápida ignición y quema total del combustible. El índice de cetano es un valor calculado en base a la densidad y la destilación del combustible. El índice de cetano no es aplicable cuando se han utilizado aditivos para la mejora del cetano.

#### **i) Punto de inflamación**

Se define como la mínima temperatura a la cual los vapores originados en el calentamiento a una cierta velocidad de una muestra de combustible se inflaman cuando se ponen en contacto con una llama piloto de una forma determinada. Esto en lo que se refiere a un combustible líquido. El punto de inflamación nos da una idea de la cantidad de compuestos volátiles o muy volátiles que puede tener un combustible. Teniendo en cuenta el punto de inflamación podremos estimar cuales van a ser las condiciones de almacenamiento de ese combustible. Según como vayan a ser las condiciones de almacenamiento, el punto de inflamación se determinará en vaso abierto Cleveland o en *vaso cerrado* Perski-Maters. Debido a los riesgos de explosión relacionados con el uso de combustibles altamente volátiles bordo de los buques, la OMI ha prohibido el uso de combustibles con un punto de inflamación inferior a 60 °C. Existen algunos estudios, lo que indica que los combustibles destilados de azufre ultra bajo, a menudo tienen un punto de inflamación inferior a 60 °C. Estos combustibles no deben ser utilizados a bordo y deben ser manejados de acuerdo con las instrucciones de la administración de la bandera y la sociedad de clases.

#### **j) Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)**

El H<sub>2</sub>S es un gas altamente tóxico y la exposición a altas concentraciones de vapor es peligroso y puede causar la muerte en casos extremos. Es presente de forma natural en los aceites crudos y se puede formar durante los procesos de refinado utilizadas para producir el combustible. H<sub>2</sub>S también pueden evolucionar a partir de los combustibles en los tanques de almacenamiento, barcasas y

tanques de clientes. Fueloil residual pueden contener diversos niveles de H<sub>2</sub>S en la fase líquida y en algunas circunstancias los niveles más altos de H<sub>2</sub>S puede ser observado en los combustibles destilados marítimos. H<sub>2</sub>S pueden estar presentes tanto en la fase líquida y de vapor y la partición entre la fase líquida y de vapor depende de un número de factores (por ejemplo, temperatura del combustible, la viscosidad, el nivel de agitación, etc.). ISO 8217: 2012 estados límite de H<sub>2</sub>S en fase líquida de 2,00 mg / kg, medido por el método de ensayo IP 570 a partir de julio de 2012. Este límite tiene la intención de proporcionar un mejor margen de seguridad. El límite en sí no constituye un nivel seguro ni elimina el riesgo de niveles muy altos de vapor de H<sub>2</sub>S desarrollados en espacios cerrados.

#### **k) Lubricidad**

Lubricidad es la capacidad de reducir la fricción entre superficies sólidas en movimiento relativo. El propio combustible protege algunas partes móviles de las bombas de combustible y los inyectores de desgaste. Combustibles con mayor viscosidad proporcionan suficiente lubricidad. Para evitar un desgaste excesivo, el combustible debe tener un nivel mínimo de lubricidad. Los compuestos que mejoran la lubricidad están naturalmente presentes en el combustible diésel derivado del petróleo crudo por destilación. Ellos pueden ser alterados o cambiados por hidrotratamiento, el proceso utilizado para reducir el contenido de azufre y aromáticos. El uso de combustibles con mala lubricidad puede aumentar la bomba de combustible y el desgaste del inyector. Con el fin de evitar esto, un límite de la lubricidad de un máximo de 520 micras se ha definido en la norma ISO 8217: 2012 para los combustibles marinos destilado con contenido de azufre de menos de 0.5%.

#### **l) Rangos de viscosidad y contenido de azufre**

Las nuevas restricciones sobre el contenido de azufre determinan los tipos de combustibles que se pueden utilizar en los buques, y por lo tanto es útil para entender los valores máximo y mínimo y rangos típicos de contenido de azufre y la viscosidad estándar de los combustibles utilizados en los buques. Dato típico

que damos en la (tabla 6.3.2). La norma ISO 8217: 2005 ha sido revisada en 2010 y posteriormente en 2012 para cambiar los tipos de combustibles, límites, especificaciones e incluyen parámetros de prueba adicionales. En la actualización, la viscosidad mínima de DMA y DMB se armonizara a 2,00 cSt a 40 °C, y DMC era reclasificado como combustible residual.

Fuel Type	Viscosity (cSt) (at 50°C for IFO and 40°C for Distillate Fuels)			Sulfur Content (%)	
	Minimum	Maximum	Typical Range		
IFO180	–	180	–	4.6%	1% - 3.6%
IFO380	–	380	–	4.6%	1% - 3.6%
DMB	–	11	2.6-6	2%	0.03% - 1.3%
DMA	1.6	6	2-4	1.6%	0.01% - 1%
ULSD	1.9	4.1	–	0.00015%	–

**Tabla 6.3.2 - Relación viscosidad / contenido azufre.**

Llama la atención que los precios MGO disminuyeron más bruscamente que todos los demás precios de los productos. Tanto el precio del diésel de automoción y el precio HFO disminuyeron lentamente, en comparación con el petróleo crudo. Esto puede explicarse por la relativamente alta proporción de los costos de capital en el coste final del producto de los combustibles. Uno esperaría que MGO seguiría la misma tendencia. Este, de todos modos, no es el caso. El precio del MGO disminuyó relativamente rápido en comparación con el precio de HFO y el gasóleo de automoción, mientras que sus características son relativamente similares a gasóleo de automoción.

Esta notable caída de los precios sugiere lo siguiente: que la disponibilidad de combustible MGO es acrítico y puede haber incluso un exceso de oferta de MGO. Hay un continuo cambio hacia una mayor producción de MGO / destilado y una menor producción de HFO, por ejemplo el aumento de la oferta de MGO

de Rusia, el Medio Oriente y los Estados Unidos. De acuerdo con la OPEP la producción mundial de combustible residual se ha reducido en un 10% durante el período 2010-2014, mientras que la producción de destilados se ha incrementado en un 7% (OPEP, 2015). La corrección puede ser el resultado de las ventajas de la economía de escala.

Las investigaciones futuras deberían hacerse sobre si la diferencia de precio entre el MGO y HFO seguiría la misma ruta que en el año 2015 si el precio del petróleo crudo aumentará de nuevo.

## **6.4 COMBUSTIBLES "LOW SULPHUR" PARA USO MARINO**

Con las nuevas normativas muchos armadores han tenido que seleccionar el cambio de combustibles residuales por combustibles ligeros de bajo por ciento de azufre, dando lugar por una parte al cumplimiento de las regulaciones pero por otro lado en algunos casos ha ocasionado problemas con el proceso de trabajo del motor, tales como la pérdida de potencia en cuanto ha sido solicitada (maniobras) provocando en ocasiones paradas inadmisibles del motor que pueden conducir a serias averías en el buque.

Uno de los aspectos importantes de este trabajo es suministrar información y recomendaciones para trabajar con combustible de diferentes características físico química como son los destilados ultraligeros.

Es importante destacar la importancia y garantía que deben de poseer los combustibles, en este caso los combustibles destilados. Los mismos deben de garantizar una rápida puesta en marcha y un trabajo uniforme del motor en diferentes regímenes de carga sin provocar carbonización en los inyectores ni formaciones de costra y corrosiones en el equipo de alimentación. Deben poseer la viscosidad necesaria para garantizar la lubricación de los elementos encargados de la inyección para evitar agarrotamientos y tener buena propiedad de atomización y no contener agua ni impurezas mecánicas sin olvidar su contenido de azufre.

Preocupaciones operativas de la conmutación entre HFO y LSFO a LSGO tienen el potencial de varios efectos nocivos sobre los motores diésel como se explica en los siguientes párrafos.

Los niveles de azufre están obligados a ser inferior a 1%. Si el LSHFO es creado por una unidad de desulfuración, la aromaticidad de combustible se puede disminuir lo que puede resultar en una menor estabilidad del combustible. Una consecuencia de que esto ocurra se incrementa los problemas de incompatibilidad de combustible cuando se mezcla con combustible pesado regular durante los cambios de combustible. El procesamiento de bajo contenido de azufre también puede conducir a problemas de calidad adicionales tales como dificultades de encendido y de combustión y el aumento de los niveles de finos catalíticos. Además, cuando LSFO se lleva a bordo para su uso en una ECA, se establece en el anexo VI del Convenio MARPOL ser almacenados y purificado por separado del HFO regular. Esto puede requerir cambios en las tuberías para la transferencia de combustible y sistema de purificación. Los LSFO no se pueden utilizar en las zonas ECA, ni en puertos de la EC. Desde el 1 Enero del 2015, el límite de azufre es de 0,1% en todas las ECA por lo que será necesario sustituirlos totalmente por LSGO que cumplen con la normativa.

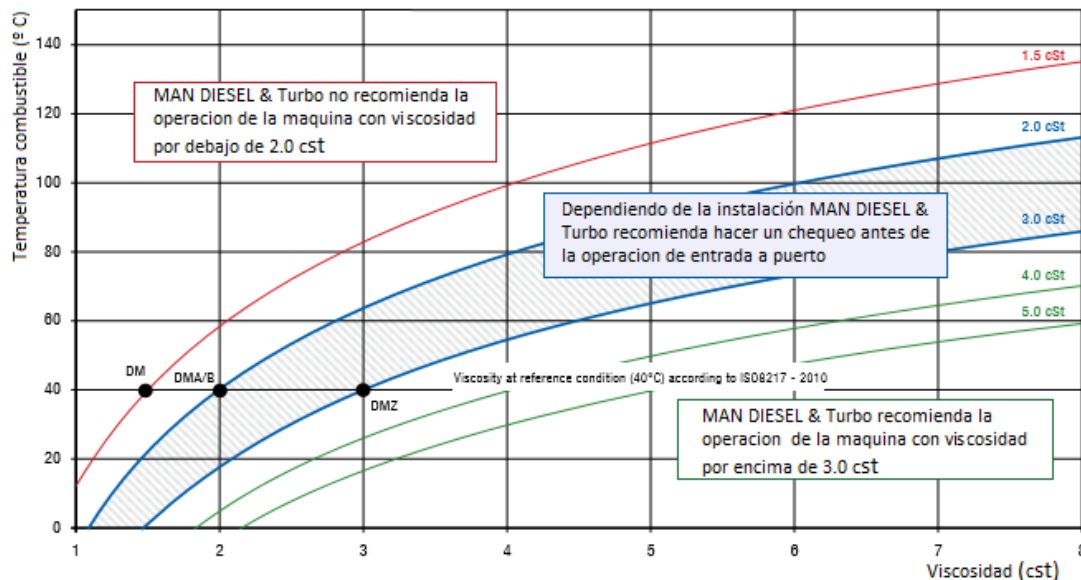
## **6.5 EFECTOS DEL COMBUSTIBLE "LOW SULPHUR" EN EL MOTOR**

### **6.5.1 EFECTOS POR REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD Y LUBRICIDAD**

Si se reduce la lubricidad (eficacia como un lubricante) el espesor de la película entre el émbolo de la bomba de combustible de alta presión y el casquillo en las válvulas de combustible conducen a un desgaste excesivo, pudiendo provocar que los elementos se peguen quedando fuera de servicio. Esto puede ser minimizado mediante la compra de combustibles destilados con aditivos para la mejora de la lubricidad y una viscosidad  $3,0 \text{ mm}^2/\text{s}$  (cSt) a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La baja viscosidad del combustible puede provocar fugas de combustible por los sellos de las bombas de circulación y alimentación disminuyendo la capacidad de entrega de combustible provocando que el motor no pueda alcanzar la potencia requerida.

Como una fuga interna es parte del diseño y se utiliza en parte para lubricar los elementos de bombeo, puede causar un aumento de las fugas de combustible y, en consecuencias conducir a menores presiones de inyección dando como resultado dificultades durante el arranque y funcionamiento a baja carga del motor.

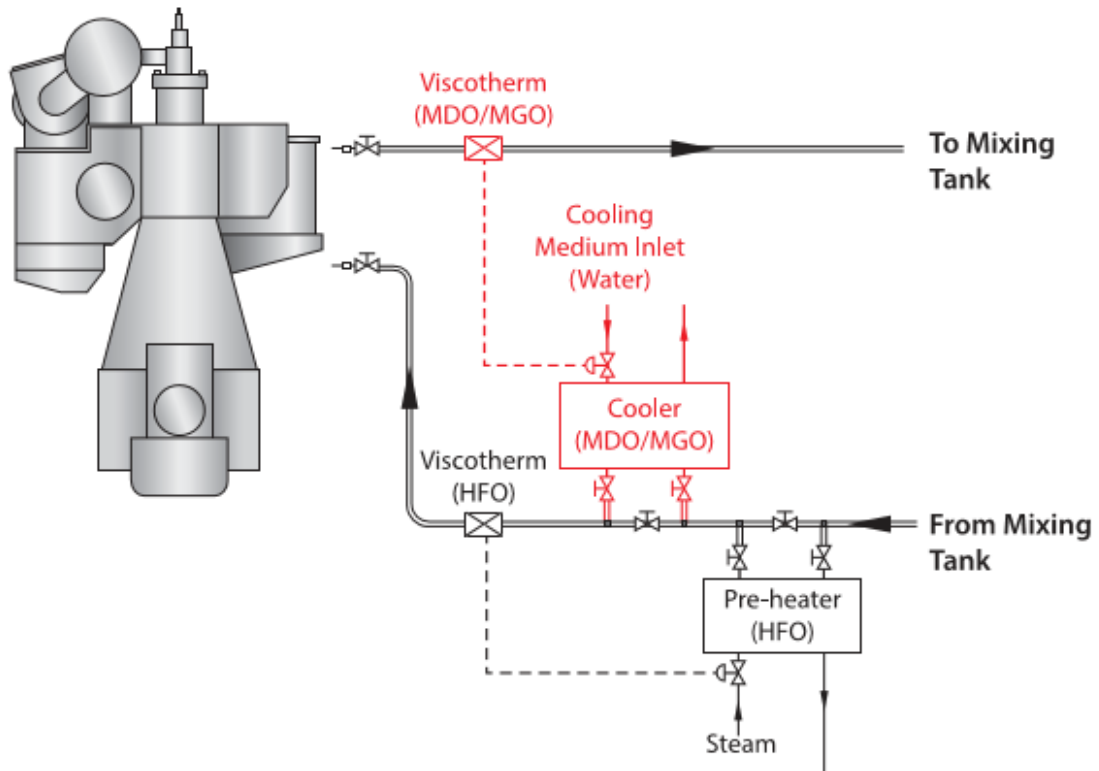


**Figura 6.5.1.1 - Gráfica que relaciona la temperatura y viscosidad**

El mantenimiento de la viscosidad por encima del valor mínimo de 2,0 mm<sup>2</sup>/s (cSt) a 40 °C garantiza una mayor fiabilidad del trabajo del motor. Una de las soluciones es instalar un intercambiador de calor para el combustible (para las condiciones tropicales equipadas con unidad de refrigeración) que mantenga a la temperatura del combustible por debajo de 40 °C.

Acerca de la temperatura del combustible, por lo general, HFO se calienta a aproximadamente 150 °C y cuando tiene que ser cambiado a MGO, que su temperatura esta alrededor de 40 °C, por lo que la brecha de temperatura es de aproximadamente 110 °C. Teniendo en cuenta la tasa permitida de cambio de

2,0 °C/min, el proceso de sustitución del combustible debe durar un mínimo de 55 minutos para llevarse a cabo de forma segura. Un cambio rápido de HFO a MGO puede causar un sobrecalentamiento del MGO lo que provoca una rápida pérdida de la viscosidad y la formación de gases en el sistema de combustible.



**Figura 6.5.1.2 - Instalación de un enfriador cuando se trabaja con LSGO en trópicos**

Del mismo modo, un cambio demasiado rápido desde el MGO sin temperatura para HFO puede conducir a un enfriamiento excesivo del HFO y por lo tanto un aumento de la viscosidad, dando como resultado una posible pérdida de potencia o apagado del motor. Por lo tanto, se recomienda realizar el cambio de combustible con el motor a niveles de potencia más bajos. La carga, sin embargo, no debe ser demasiado baja de lo contrario el tiempo de mezcla del combustible pesado y el MGO en el sistema de servicios aumenta con el consiguiente riesgo de precipitación de asfaltenos, obstrucción de filtros y por lo tanto la pérdida o fallo de alimentación en el motor. Por lo general, el cambio se realiza en la velocidad de maniobra y la viscosidad del combustible debe estar tan cerca como recomienda el fabricante del motor. El barco debe estar con combustible bajo en azufre antes de entrar en la zona ECA o puertos.



### **6.5.2 EFECTOS POR LA BAJA DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE**

Los combustibles de baja viscosidad típicamente tienen una baja densidad en comparación con los combustibles pesados. Esto resultará en menos energía por volumen de combustible (contenido de energía volumétrica) y por lo tanto requerirá más volumen de combustible ser suministrado al motor para mantener la potencia equivalente. Los reguladores de velocidad del motor y la automatización deben ser capaces de adaptarse a los cambios en la posición de la cremallera de combustible y ajustes del regulador.

### **6.5.3 EFECTOS DE LA INCOMPATIBILIDAD DE LOS COMBUSTIBLES**

Si se produce una incompatibilidad, puede dar lugar a la obstrucción de los filtros de combustible y separadores y pegado de las bombas de inyección de combustible, todo lo cual puede conducir a la pérdida de poder o incluso parar al motor propulsor, poniendo en riesgo la nave. Los problemas de incompatibilidad pueden ser causados por las diferencias de estabilidad entre los combustibles mixtos. Los combustibles de bajo azufre y, como consecuencia los asfáltenos pueden precipitar de la mezcla en forma de lodo pesado, provocando la obstrucción de filtros. Esto puede ser evitado o minimizado a través del kits de pruebas de compatibilidad que debemos de tener a bordo y utilizado cuando se toma combustible. En general, no se recomienda devolver la mezcla de combustible al tanque de servicio de ultra bajo en azufre.

### **6.5.4 Efectos del cambio de lubricante según el combustible**

Los motores diésel requieren lubricación con el fin de operar de manera eficiente y estos aceites lubricantes tienen que ser compatibles con el combustible utilizado en el motor. Por lo tanto, si el aceite de lubricación BN (Número de Base) no coincide con la acidez del combustible que va a tener un efecto sobre el mantenimiento de un lubricante compatible entre el combustible y el aceite. El

BN70 demasiado alto puede desarrollar calcio y otros depósitos en las superficies del revestimiento. El BN30-50 demasiado pequeño puede aumentar la acidez del combustible y provocar un desgaste adicional en las piezas, así como la creación de problemas al quemar el combustible. Los aceites lubricantes se utilizan para neutralizar los ácidos formados en combustión, en su mayoría ácido sulfúrico creado a partir de azufre en el combustible. La cantidad de aditivos de neutralización de ácidos en el aceite lubricante debe coincidir con el contenido total de azufre del combustible. Se ha establecido que un cierto nivel de corrosión controlado mejora la lubricación. La corrosión genera pequeñas "bolsas" en la superficie de contacto de la camisa del cilindro en las que se crea un efecto parecido al de lubricación hidrodinámica de aceite. En otras palabras, la corrosión controlada es importante.

## 7 FORMACIÓN DE CONTAMINANTES

### 7.1 COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE EXHAUSTACIÓN

Los principales contaminantes en las emisiones de escape diésel son un resultado directo del proceso de combustión de diésel en sí. Las concentraciones típicas de las emisiones de gases de escape de los motores diésel marinos comprenden gran parte de nitrógeno de aproximadamente 76%, oxígeno. 13%, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) aprox. 5% y el vapor de agua aprox. 5%, con cantidades más pequeñas de contaminantes: óxido nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) ,1500 ppm, óxido de azufre ( $\text{SO}_x$ ) 600 ppm, monóxido de carbono (CO) aprox. 60 ppm, parcialmente reaccionado e hidrocarburos no quemados (HC) 180 ppm y materia particulada (PM) aprox. 120 mg/Nm<sup>3</sup>. La composición de esta mezcla de gases, líquidos y sólidos que son emitidas en el aire variará en función del tipo de motor, la potencia del motor, condiciones de funcionamiento así como el combustible y lubricante de tipo aceite y también depende de si el sistema de control de emisiones está presente.

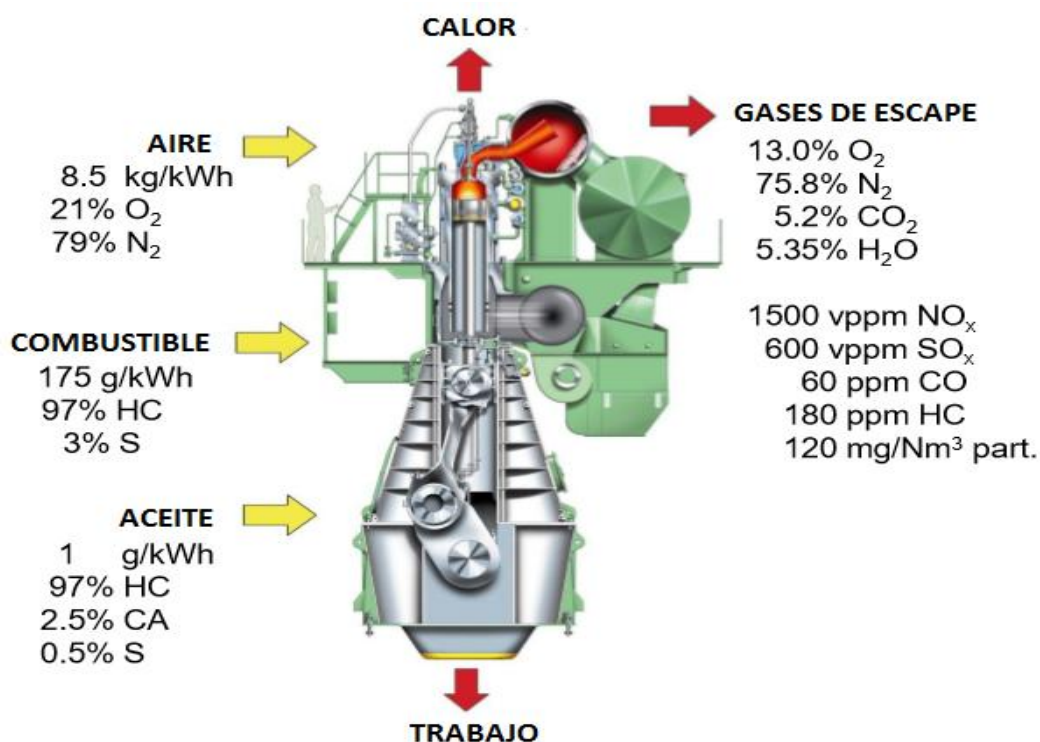


Figura 7.1.1 - Principales componentes de los gases de escape según MAN D&T

## 7.2 FORMACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

Los óxidos de nitrógeno se refieren a un conjunto de emisiones de óxido nítrico (NO), dióxido nítrico (NO<sub>2</sub>), y trazas de otros generados en la combustión. La combustión de cualquier combustible fósil produce un determinado nivel de NO<sub>x</sub> debido a las altas temperatura y a la disponibilidad de oxígeno y nitrógeno, tanto en el aire, como en el combustible. Las emisiones de NO<sub>x</sub> generadas en los procesos de combustión están constituidas por un 90 a 95% de NO, y el resto por NO<sub>2</sub>. Cuando los gases de escape abandonan la chimenea una gran parte del NO se oxida en la atmosfera, pasando a NO<sub>2</sub>, una vez en la atmósfera intervienen en una serie de reacciones que forman contaminantes secundarios. El NO<sub>2</sub> puede reaccionar con la luz solar y con radicales de hidrocarburos, para producir smog fotoquímico (ozono troposférico O<sub>3</sub>) y lluvia ácida. Hay dos mecanismos normales de formación de los NO<sub>x</sub>, el térmico y el del combustible.

El NO<sub>x</sub> térmico se forma a alta temperatura por la oxidación del nitrógeno que se encuentra en el aire comburente, su velocidad de formación depende de la temperatura y del tiempo de permanencia en la misma. Se forman cantidades significativas de NO<sub>x</sub> a temperatura superiores a 1300 °C, aumentando de forma exponencial.

La formación de NO<sub>x</sub> térmico se controla reduciendo la temperatura máxima y promedia de la llama de la combustión.

## 7.3 FORMACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE AZUFRE (SO<sub>x</sub>)

La formación de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) en los gases de escape, es causada por la oxidación del azufre elemental en el combustible, en monóxido de azufre (SO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) durante el proceso de combustión.

El monóxido de azufre (SO) reacciona con el oxígeno (O<sub>2</sub>) para producir dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) a altas temperaturas. La cantidad de emisiones de dióxido de

azufre depende del contenido de azufre del combustible utilizado y no puede ser controlada por el proceso de combustión. Además, el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), no puede ser creada en la combustión en condiciones ricas en combustible, incluso cuando la combustión se encuentra cerca del punto estequiométrico. Sin embargo, si hay, incluso un exceso de aire 1%, el trióxido de azufre aumenta rápidamente en su cantidad.

Por lo general, la cantidad de  $\text{SO}_3$  es del 5% de la cantidad de óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ ). Por ejemplo, si el combustible contiene 3% de azufre, el volumen de  $\text{SO}_x$  generado es de alrededor de 64 kg por tonelada de combustible quemado; si se utiliza combustible con contenido de azufre del 1%, la cantidad de emisiones de  $\text{SO}_x$  es de unos 21 kg por tonelada de combustible quemado. Los  $\text{SO}_x$  formados a partir de gases de escape de los motores diésel es corrosivo y se neutraliza en parte por el aceite de lubricación del motor.

Los **óxidos de azufre más importantes** por lo que respecta a la contaminación atmosférica **son** el dióxido de azufre,  **$\text{SO}_2$**  y el trióxido de azufre,  **$\text{SO}_3$** . La emisión del dióxido es muy superior cuantitativamente a la del trióxido. Los dos se emiten conjuntamente y la proporción del segundo es de un 1% a un 5% del total. El dióxido de azufre en altas concentraciones puede ser un gas irritante que provoca alteraciones en los ojos y en las vías respiratorias. En determinadas circunstancias, se producen reacciones químicas en las cuales este dióxido se puede transformar en trióxido. Por su parte, el trióxido de azufre no permanece mucho tiempo en la atmósfera, ya que es altamente higroscópico y en contacto con la humedad se transforma en ácido sulfúrico. Este ácido arrastrado por el agua de lluvia tiene efectos corrosivos producidos por la lluvia ácida sobre los recursos naturales.

## 7.4 FORMACIÓN DE LA MATERIA PARTICULADA (PM).

La materia particulada es un término genérico, para una clase amplia de diversas sustancias físicas y químicas. Puede ser caracterizado como partículas discretas que existen en fase líquida o sólida, que abarcan varios ordenes de

magnitud en tamaño. Desde 1987 la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), ha clasificado ese subconjunto de partículas inhalables lo suficientemente pequeños para penetrar en la región torácica. Los estándares nacionales de calidad del aire ambiental (NAAQS), utiliza PM 2.5 como el indicador para las partículas finas, con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  (micra), y el uso de PM10 como indicador para las partículas gruesas, con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 $\mu\text{m}$ .

Las partículas finas son producidas principalmente por los procesos de combustión y por las transformaciones de las emisiones gaseosas (por ejemplo,  $\text{SO}_x$ , y  $\text{NO}_x$ ) en la atmósfera. Las propiedades físicas y químicas de PM2.5 pueden variar en gran medida en dependencia de la región y la meteorología. Por lo tanto PM2.5 puede incluir una mezcla compleja de diferentes contaminantes incluyendo sulfatos, nitratos, compuestos orgánicos, carbono elemental y compuestos metálico; estas partículas pueden permanecer en la atmosfera durante días o semanas y viajar a través de cientos de miles de kilómetros en la atmosfera.

## 7.5 HIDROCARBUROS (HC)

La fracción de hidrocarburos (HC) de los gases de escape será el resultado de productos resultantes de la combustión, quemados o parcialmente quemados, de combustibles y lubricantes. En realidad, esta fracción comprende una variedad de compuestos orgánicos individuales con casi todas las variaciones químicas de C, H, O, N y S, aunque, en concentraciones más bajas.

Los componentes individuales pueden estar presentes en cualquiera de las fases de vapor o de partículas o pueden distribuir entre las dos fases con reacciones de evaporación, condensación y polimerización que llevan a una distribución de constante cambio. En consecuencia, la naturaleza diversa de los componentes de la fracción de hidrocarburos hace muy difícil la cuantificación de las emisiones y su identificación con los problemas de salud y ambientales específicos.

## 8 TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES AÉREAS

Los armadores para cumplir con las nuevas regulaciones del MARPOL Anexo VI, tienen a su alcance un mercado que le ofrecen diversas soluciones, junto con la asesoría de la sociedad de clasificación a que pertenecen y fabricantes de motores y equipos, para poder equipar sus motores y sistemas de escape con las tecnologías o medidas convenientes, dependiendo principalmente de factores tales como:

- Tipos y características de los buques.
- Tipos de motores propulsores.
- Zonas y rutas donde operan.
- Tiempo de vida útil del buque.

Cabe señalar que esta nueva situación de cumplir con las regulaciones del nivel III de carácter obligatorio sobre emisiones es un gran problema para los armadores u operadores de buques por su implantación en corto periodo de tiempo y por el gran coste que significa la instalación de un equipo de tratamiento o cualquier otra modificación en un momento económico nada favorable. Muchos operadores claman por recibir algún tipo de ayuda de entidades financieras u organizaciones internacionales, otra forma es revertir esa ayuda en refinerías para mejorar la producción de combustibles con los parámetros físicos químicos que garanticen que cumplan con las regulaciones presentes y futuras a, un precio competitivo.

### 8.1 TÉCNICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE NO<sub>x</sub>

Las emisiones de NO<sub>x</sub> de los motores en el transporte marítimo internacional no estaban regulados hasta el año 2000, después de que los nuevos motores tenían que cumplir con el llamado nivel I. Las emisiones de NO<sub>x</sub> permitidos en los reglamentos se expresan como masa de NO<sub>x</sub> por kWh trabajo del motor, y son una función de la velocidad del motor, lo que permite mayores emisiones de los motores de baja velocidad que los motores de alta velocidad. En el Nivel I las

emisiones permitidas estaban en el rango de 9,8 -17 g/kWh. Para los motores a partir de 2011 se aplica la normativa nivel II en la que se regulan las emisiones en el rango de 7,7-14,4 g/kWh. El nivel III de las reglas que comenzaron a aplicarse a partir de 2016 son mucho más estrictas, 1,96 - 3,4 g/kWh, y sólo se aplicarán en las zonas de control de emisiones de NO<sub>x</sub>. Por el momento las únicas zonas ECA son las de América del Norte y Estados Unidos Mar Caribe.

Los fabricantes de motores han explorado muchos caminos para encontrar maneras de satisfacer las regulaciones cada vez más estrictas respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub>, a partir del 26 de julio del 2016. En la actualidad existen seis medios probados con cierta eficacia y son los más demandados. Estos son:

1. Optimización del motor.
2. Inyección directa de agua (DWI).
3. Humidificación de la carga de aire.
4. Recirculación de gases de escape (EGR).
5. Reducción Catalítica Selectiva (SCR).
6. Motores Duales - Gas Natural licuado (GNL).

### **8.1.1 OPTIMIZACIÓN DEL MOTOR**

La reducción de emisiones a los niveles de nivel II se puede lograr mediante modificaciones internas del motor en la que se ajustan los parámetros de la combustión, la mayoría de estas modificaciones vienen ya instaladas en los motores de nueva construcción, las mismas fueron probadas e introducidas en los motores para cumplir con el nivel I de control de emisiones de NO<sub>x</sub>, sin embargo, para alcanzar los límites nivel III serán necesarios cambios importantes.

Hay varias maneras de modificar el proceso de combustión, cada una destinada a reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>. La optimización del proceso de combustión del motor incluye la modificación del patrón de pulverización mediante la modificación del diseño del inyector de combustible, tiempo de inyección, la intensidad de la inyección y perfil de velocidad de inyección, la relación de



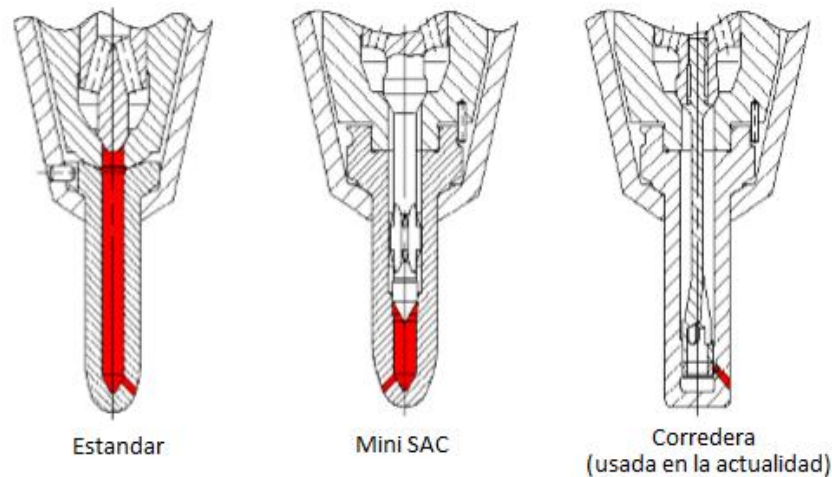
compresión, presión del aire de barrido y refrigeración del aire de barrido. El atraso del tiempo de inyección es muy eficaz en la reducción de  $\text{NO}_x$ , pero aumenta el consumo de combustible y el humo. Por lo general, se combina con el aumento de la presión de compresión y disminución de la duración de la inyección para minimizar o evitar un aumento en el consumo de combustible.

La evolución reciente de los motores de baja emisión de  $\text{NO}_x$  implica un ajuste preciso del proceso de inyección de combustible. Modelos CFD de la dinámica de la pulverización del combustible que se quema en la cámara de combustión del motor han sido utilizados con éxito por los fabricantes de motores, en conjunto con pruebas prácticas, para desarrollar las boquillas de combustible de bajo  $\text{NO}_x$ .

Otras modificaciones que se podrían hacer para reducir las emisiones son la optimización de la cámara de combustión, sincronización variable de válvulas, el aumento de la eficiencia del turbo, el uso de un sistema de inyección de combustible que se puede ajustar fácilmente (por ejemplo, sistema de inyección de control electrónico) y la disminución de la temperatura entrada de aire al motor usando sobrealimentación Miller. Modificación del diseño de la válvula de combustible que significa la sustitución de los inyectores convencionales con válvulas de bajo consumo de combustible (por ejemplo, válvulas de corredera) que optimizan el combustible que se inyecta en el cilindro. Estas válvulas se diferencian de las válvulas convencionales en sus patrones de pulverización, y que están diseñados para reducir el goteo de combustible desde el inyector en la zona de combustión después de la inyección.

El cambio de las válvulas de combustible convencionales con válvulas tipo "slide" tiene un impacto significativo en la reducción de emisiones de  $\text{NO}_x$  y PM. En la actualidad, las válvulas de combustible "slide" sólo son aplicables para motores diésel de dos tiempos de baja velocidad. Hoy en día, se supone que todos los nuevos motores de este tipo tienen estas válvulas instaladas como estándar. La tobera de combustible se ha optimizado para  $\text{NO}_x$  simultáneamente con el desarrollo de la válvula de corredera.

Los motores de baja velocidad utilizan dos o tres inyectores de combustible situados cerca del borde exterior de la cámara de combustión. Cada tobera de inyección tiene una serie de agujeros. La interacción entre los aerosoles a partir de orificios de boquilla individuales tiene un impacto significativo en  $\text{NO}_x$ . Existen un número mínimo óptimo de orificios de la tobera de  $\text{NO}_x$ .



**Figura 8.1.1.1 - Evolución en el diseño de inyectores de combustible**

[http://www.ppcac.org/pdfs/Kjeld\\_Aabo\\_Man.pdf](http://www.ppcac.org/pdfs/Kjeld_Aabo_Man.pdf)

En el ciclo Miller el aire de carga se comprime a una presión mayor que la que se necesita para el ciclo del motor. Un relleno reducido de los cilindros se controla entonces por temporización adecuada de la válvula de entrada que permite entonces una cierta expansión del aire de carga a tener lugar dentro de los cilindros. Este proceso de expansión permite la refrigeración de la carga al comienzo del ciclo con lo cual aumenta su densidad. Esto resulta en la posibilidad de que la potencia de un motor dado se incremente. La aplicación práctica del ciclo Miller, sin embargo, requiere un turbocompresor capaz de conseguir relaciones de presión alta del compresor en asociación con alta eficiencia a estas condiciones. Si bien inicialmente desarrollado con el objetivo de aumentar la potencia del motor, se ha encontrado que el ciclo de Miller se puede utilizar, mediante la reducción de las temperaturas del ciclo a presión constante, para reducir la formación de  $\text{NO}_x$  durante la combustión.

Transformando un motor diésel al ciclo Miller, se puede llegar a un 20% de reducción de  $\text{NO}_x$  sin incrementar nada el consumo de combustible.

Los nuevos motores controlados electrónicamente “camshaftless” permiten una gran flexibilidad para la optimización del proceso de combustión en toda la gama de condiciones de funcionamiento han permitido una mayor flexibilidad operativa. En lo que se refiere a  $\text{NO}_x$ , las características principales son de control por ordenador de sincronización variable de inyección (VIT), la formación de la tasa de inyección, presión de inyección variable y válvula de escape variable de cierre (VEC). EL cierre de escape variable da la capacidad de cambiar la relación de compresión efectiva. Con VEC y VIT, es posible optimizar la interacción de retardo de tiempo de inyección y una mayor relación de compresión en todo el rango de carga, para mantener las presiones de pico a baja carga, evitando picos de presión excesivos a alta carga. La inyección common-rail da altas presiones de inyección y por lo tanto buenas características de pulverización, incluso a bajas cargas.

La velocidad de alimentación de aceite del cilindro tiene un impacto en la emisión de partículas. Las pruebas muestran que cuando se reduce la tasa de alimentación de aceite del cilindro, la emisión de partículas se reduce también. El objetivo es reducir la dosificación de aceite lubricante de cilindro, y al mismo tiempo mantener una adecuada lubricación para asegurar una tasa satisfactoria de desgaste de los aros y superficie del pistón y mantener o mejorar, el tiempo entre revisiones. MAN Diesel ha logrado esto mediante el desarrollo del sistema “Alfa Lubricador”, que es un lubricador controlado electrónicamente que inyecta el aceite de lubricación en el cilindro en la posición exacta y el tiempo en el que el efecto es óptimo, lo que no siempre es posible con los convencionales engrasadores mecánicos.

Mediante la aplicación de una dosis baja de aceite, aproximadamente la mitad de las emisiones habituales se bajan, y también menos de cilindros se desperdicia en el motor, en el que podría terminar en el aceite del sistema del motor, lo que resulta en un aumento de la viscosidad y TBN.

### 8.1.2 INYECCIÓN DIRECTA DE AGUA AL CILINDRO

La inyección directa de agua en la cámara de combustión, denominada por sus siglas en inglés DWI, es otro de los métodos encaminados a la reducción de NO<sub>x</sub>. El desarrollo inicial de este sistema corresponde a la empresa holandesa Wärtsilä y fue iniciado en el 1993. En el 2005 ya estaba instalado en más de 23 buques.

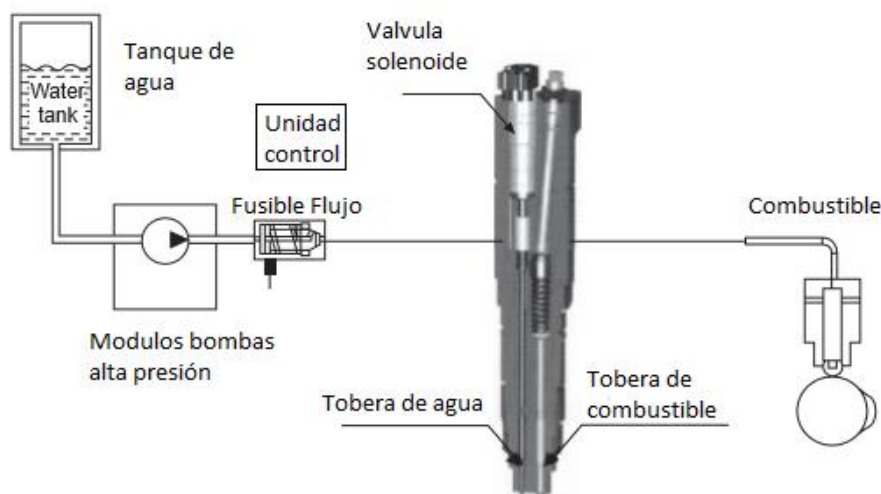
El motor de inyección directa de agua está equipado con una válvula de inyección combinada y la boquilla permite la inyección de agua y combustible en el cilindro. Esto significa que ninguno de los modos (agua on / off) afectará el funcionamiento del motor. El motor puede ser transferido al modo de funcionamiento agua off en cualquier carga, la transferencia en situaciones de alarma será automática e instantánea.

La inyección de agua se lleva a cabo antes de la inyección de combustible, resultando en un espacio de combustión más fría y por lo tanto, menor generación de NO<sub>x</sub>, la inyección de agua se detiene antes de que se inyecta el combustible en el cilindro de modo que el proceso de encendido y la combustión no se perturba. El agua limpia se inyecta al cilindro a una presión de 210 a 400 bares (dependiendo del tipo de motor) por un sistema de común raíl, la presión es generada en un módulo de bomba de alta presión; una bomba de baja presión también es necesaria para garantizar un flujo de agua suficientemente estable para la bomba de alta presión. Un fusible de flujo está instalado en el lado de la culata. El fusible de flujo actúa como un dispositivo de seguridad, cerrando el flujo de agua en el cilindro si la aguja de agua se queda atascada. La sincronización de la inyección de agua y la duración es controlada electrónicamente por la unidad de control, que toma su entrada desde la salida del motor.

El agua y el combustible se inyecta con una relación de agua a combustible de 0,4-0,7:1, lo que reduce las emisiones de NO<sub>x</sub> en un 50-60% sin afectar adversamente a los componentes de salida de potencia o motor. Las emisiones de NO<sub>x</sub> son típicamente 4-6 g/kWh cuando el motor está funcionando con

combustible diésel marítimo, y 5-7 g/kWh cuando se está quemando fuel oíl pesado. Está demostrado que la reducción de NO<sub>x</sub> es más eficiente a partir del 40% de carga del motor.

Estos sistemas funcionan independientemente del sistema de inyección de combustible, lo cual asegura que el sistema DWI puede ser desconectado sin que ello afecte a la operatividad del motor.



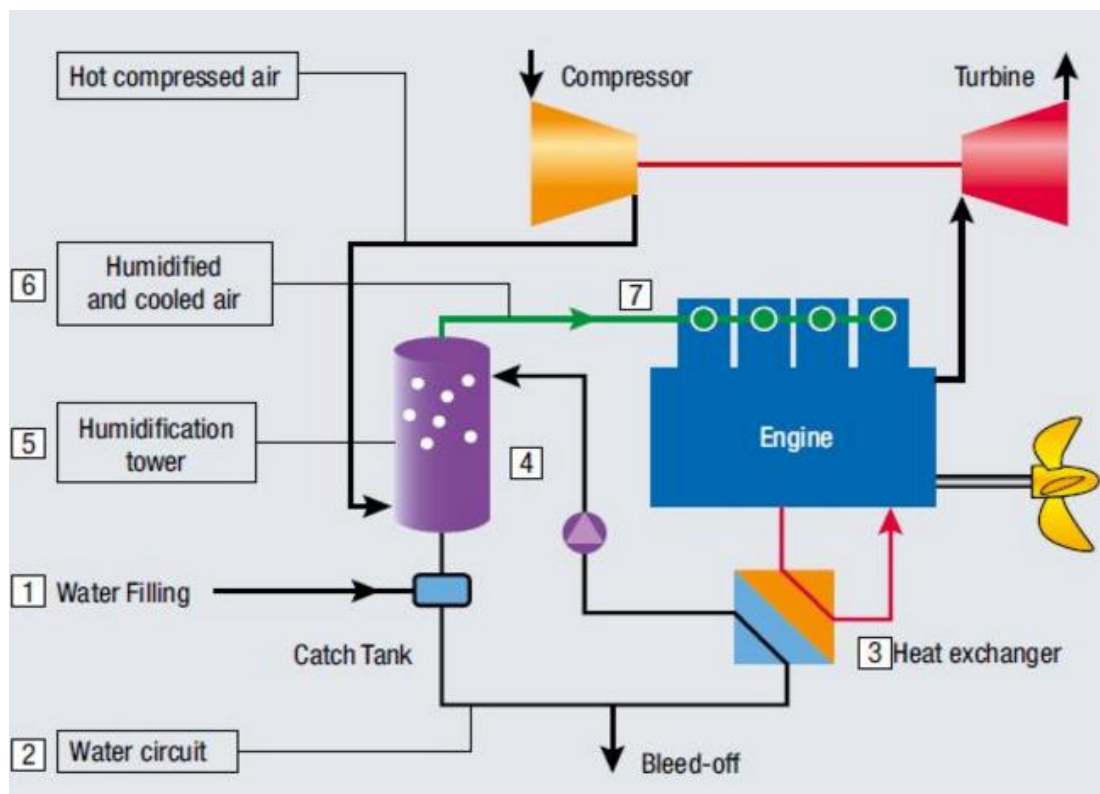
**Figura 8.1.2.1 - Sistema de inyección de agua directa de Wärtsilä**

### 8.1.3 HUMIDIFICACIÓN DE LA CARGA DE AIRE

La humidificación puede reducir los niveles de NO<sub>x</sub> hasta 2 a 3 g / kWh y sin aumento en el consumo de combustible. La humidificación ha sido probada a fondo en un motor de velocidad media. Aún no se ha probado para motores de baja velocidad. La inyección de agua directa está disponible ahora en Wärtsilä NSD motores de velocidad media para los niveles de NO<sub>x</sub> hasta cerca de 5 ó 6 g/kWh sin aumento significativo del consumo de combustible.

En este sistema el aire de carga se humidifica mediante la inyección de agua en un "spray" rociado en la entrada de aire del motor, con el fin de saturar. Por lo general, esta operación se lleva a cabo cerca de la salida del compresor, donde la temperatura es alta, y, lo que es más adecuado para la vaporización del agua

inyectada. Esta humidificación del aire es una solución relativamente simple en el potencial de reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$  y de no llevar a cabo modificaciones en el motor. El principio fundamental de funcionamiento se representa en el siguiente esquema:



**Figura 8.1.3.1 - Sistema de humidificación de la carga de aire.**

Los principales componentes del sistema son:

- Humidificador ("torre de humidificación")
- Tanque de drenaje ("Catch Tank")
- Sistema de abastecimiento de agua y unidades de precalentamiento de la misma ("Heat Exchanger")
- Sistema de monitorización y control

Inicialmente, el agua se bombea en el tanque de almacenamiento, donde se calienta a través de un intercambiador de calor (que se utilizan en los gases de escape o en el motor refrigerado por agua) antes de ir al humidificador. En este humidificador de agua caliente se pulveriza sobre el aire comprimido (también de

alta temperatura) en tres etapas, con un aumento de la pulverización superficial entre cada paso, lo que ayuda a la vaporización del fluido.

La conversión de fase de vapor de agua causada por el calor del aire comprimido, lo que resulta por un lado, un aire saturado, y por el otro lado, una disminución de la temperatura de la mezcla. Cabe destacar que sólo 5% a 10% de agua se vaporiza, y el resto se drena de regreso al tanque. Esta disminución de la temperatura del aire de entrada está haciendo más fácil para los picos de temperatura alcanzados en el cilindro son más pequeños, y por lo tanto reducir la formación de  $\text{NO}_x$ .

#### 8.1.4 RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE (EGR)

Los motores equipados con el sistema de EGR pueden suprimir el aumento de la temperatura del gas carburante y reacciones térmicas de formación de  $\text{NO}_x$  mediante la recirculación, enfriamiento y limpieza de una parte de los gases de escape desde el motor hasta el aire de admisión para reducir la concentración de oxígeno en la cámara de combustión y aumentar la relación de gases inertes, tales como dióxido de carbono, reduciendo así el pico de temperatura de combustión y la formación de  $\text{NO}_x$  contenido en el gas de escape. La reducción de  $\text{NO}_x$  es casi lineal a la relación de gases de escape recirculado.

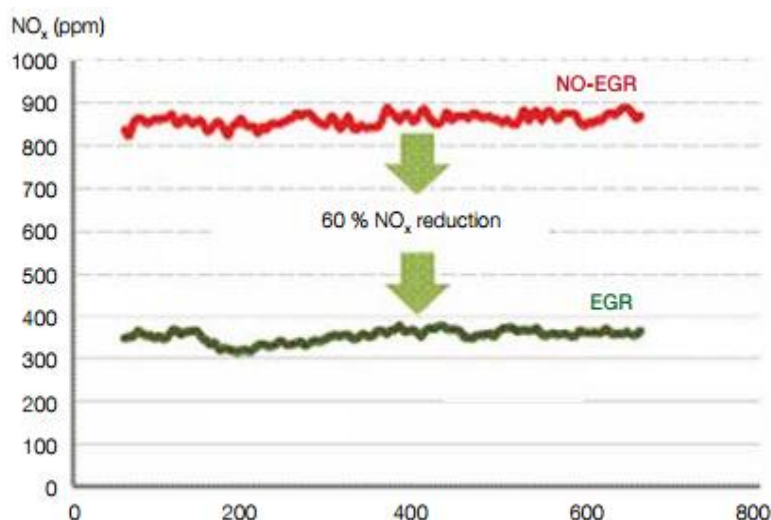


Figura 8.1.4.1 - Reducción de  $\text{NO}_x$  a bordo del portacontenedores Alexander Maersk

Los fabricantes de motores MAN con una experiencia de más de 10 años en este sistema, realizaron pruebas de banco, en el año 2004, del primer sistema EGR en un motor grande el 4T50ME-X, de dos tiempos. El sistema fue implementado por primera vez en marzo del 2010 en el buque "Alexander Maersk" con un motor 7S50MC Mk6. Y durante su periodo de pruebas demostró una reducción del 60% de NOx.

Si atendemos a los principales elementos del sistema EGR, observamos que el sistema recircula y enfría una pequeña parte de los gases de escape, mezclándolos con el aire de barrido, lo que permite una reducción de la temperatura máxima de combustión y con ello de la formación de los óxidos de nitrógeno. Mostramos su principio de funcionamiento en la siguiente figura:

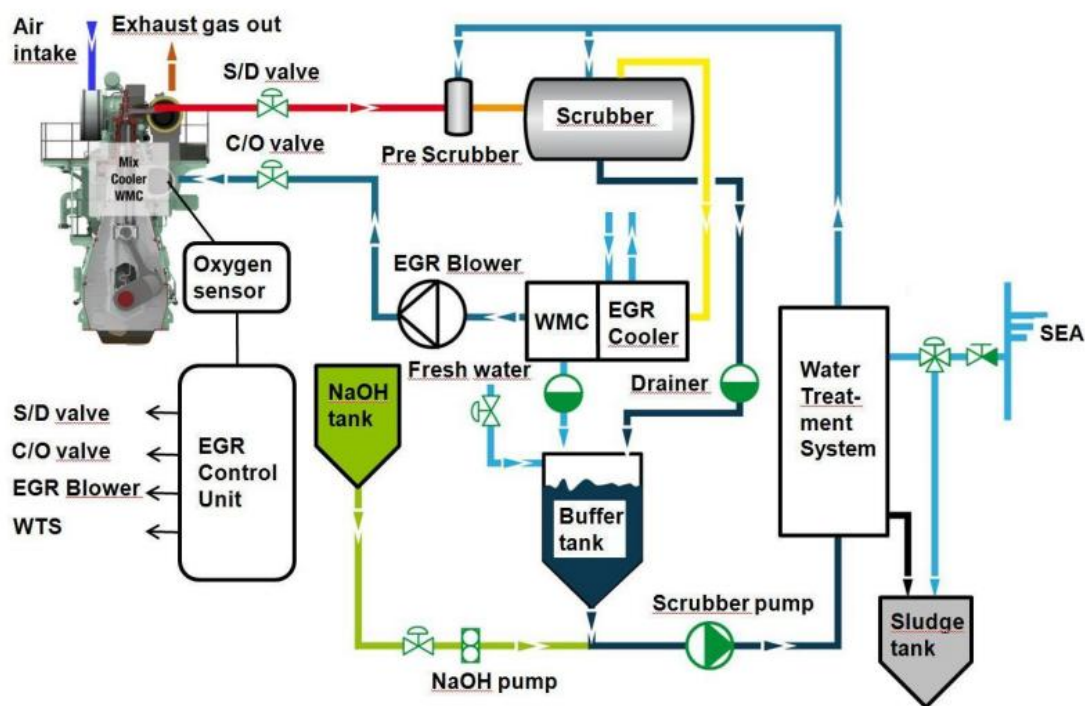


Figura 8.1.4.2 - Elementos principales del EGR.

Principales componentes del sistema:

- Depurador de gases (Scrubber)
- Sistema de tratamiento de agua. (WTS).
- Soplante (Blower).



- Separador de agua WMC (Water Mist Catcher).
- Tanque de lodos.
- Tanque Recolector.
- Tanque para disolución química NaOH (hidróxido de sodio).
- Enfriador.
- Válvulas.
- Cuadro de control

En cuanto a los modos de operación, estos vienen determinados por la normativa:

### **1. Modo Tier II.**

Es el modo estándar usado cuando se navega en zonas que no son ECA. Solo se encuentra operativa la línea principal, mientras que la línea del EGR se mantiene cerrada a través de la válvula de cierre (S/D valve). La válvula bypass del cilindro también se mantiene cerrada en este modo. Con alta carga la válvula bypass de los gases de escape se abre para incrementar la eficiencia de la máquina.

### **2. Modo Tier III.**

Este modo se utiliza dentro de las zonas ECA. La línea principal del EGR se activa, abriendo la válvula de cierre y la válvula de cambio (C/O valve). Los gases pasan a través de la línea principal del EGR y penetran en pre-scrubber (depurador), los gases saturados pasan a través del enfriador, después penetran en el depurador principal, el agua inyectada absorbe las partículas y neutraliza los sulfatos y otras materias. Los gases limpios y enfriados forzados por el soplante del EGR pasan a través de una rejilla separadora de agua (WMC). La mezcla de aire y gases recirculados entra al colector de admisión. En este modo la válvula de paso para el cilindro se abre para incrementar la presión de aire de barrido y de este modo se consigue reducir el consumo específico de combustible.

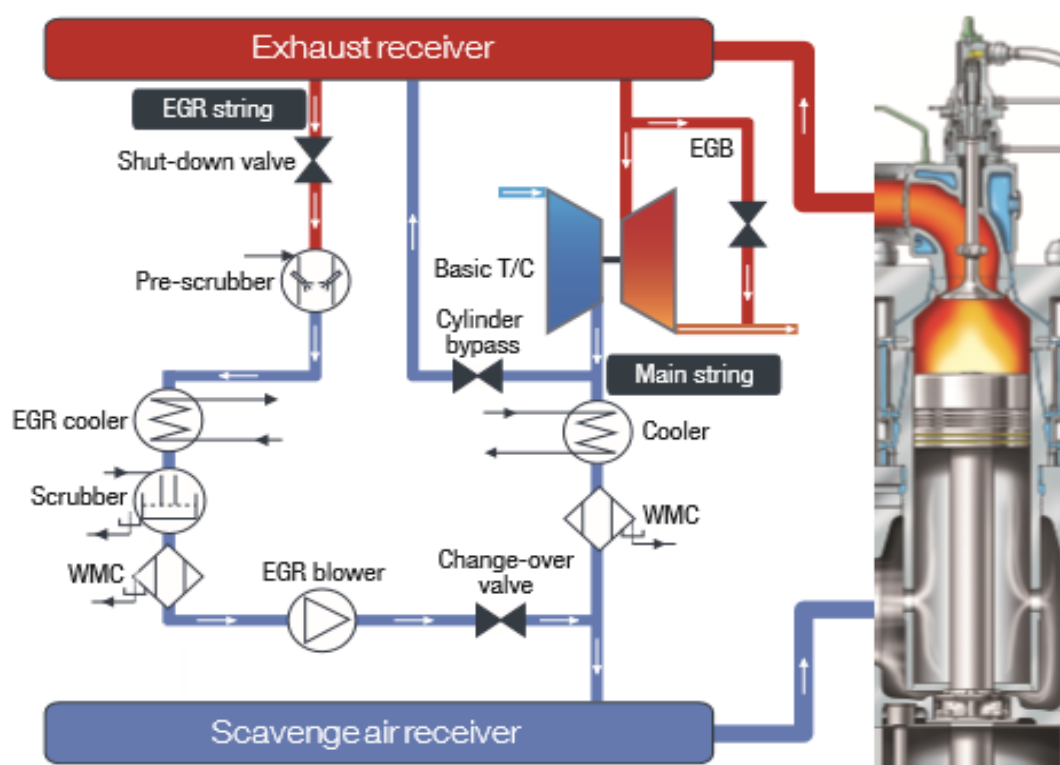
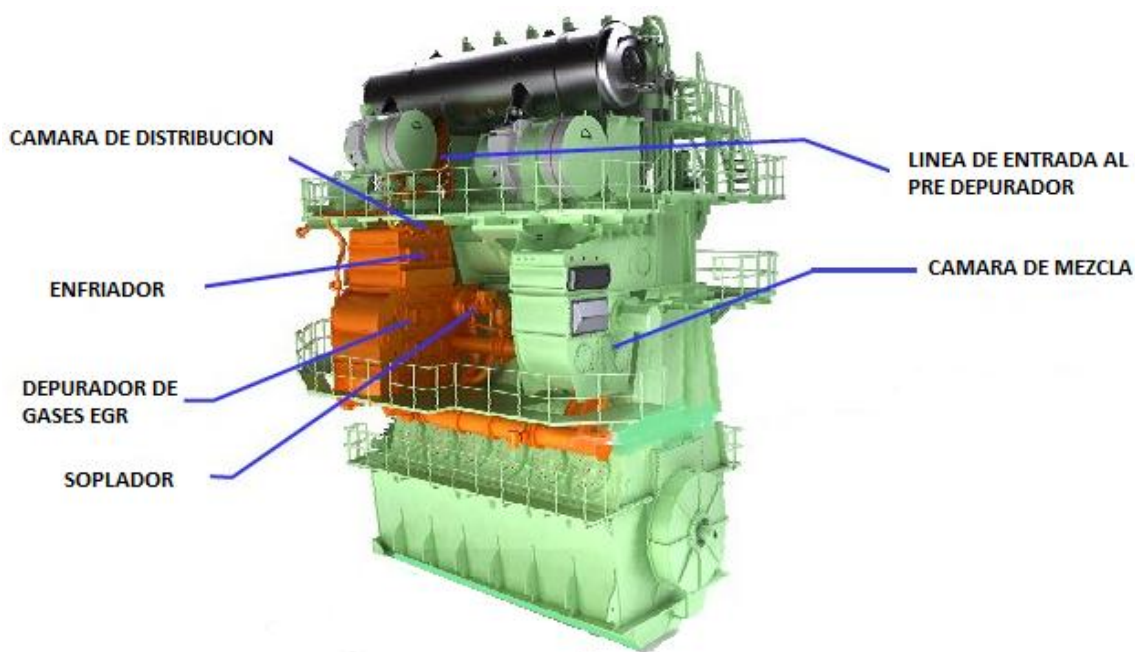


Figura 8.1.4.3 - Esquema del circuito de un EGR.



Figura 8.1.4.4 - Un equipo EGR instalado en el buque "Maersk Cardiff"



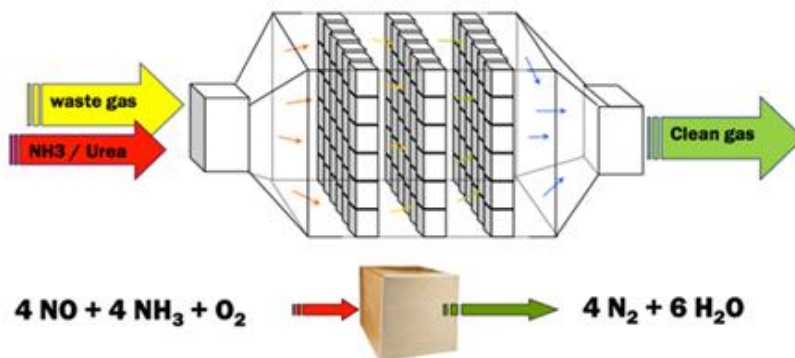
**Figura 8.1.4.5 - Sistema EGR integrado en un motor de dos tiempos**

### **8.1.5 REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (SCR)**

La Reducción Catalítica Selectiva consiste en una carcasa montada en el embudo del tubo de escape que contiene un catalizador. Un agente reductor se inyecta dentro de la carcasa, provocando que el  $\text{NO}_x$  contenido en los gases de escape sea químicamente reducido en gas nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). El catalizador es una superficie metálica en contacto con el reductor y el gas de escape, la aceleración de las reacciones químicas. El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) o urea ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) son agentes reductores típicos, mientras que los óxidos de metal (óxido de vanadio o de óxido de titanio), actúan como catalizadores.

El propio catalizador no se consume, pero puede estar recubierto por otras impurezas y por lo tanto pierde la eficiencia. Tales problemas son más probable que ocurra cuando se usa combustible HFO, que con MDO. Además del reactor catalítico como elemento principal, el sistema SCR contiene un tanque de almacenamiento para el reductor y un sistema de bombeo y de control para la inyección del reductor. El reactor de SCR también actúa como un silenciador y

reemplaza el silenciador del barco. La reducción de  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  se lleva a cabo a temperaturas de escape que van desde 270 °C hasta 500 °C, mayor temperatura provocaría daño térmico al catalizador.



**Figura 8.1.5.1 - Catalizador Selectivo**

Fuente. <http://www.filtrosdiesel.cl/reduccion-catalitica-selectiva-scr>

El reactor y el conducto de mezcla se instalan como parte integral del sistema de escape del motor, es importante que la urea se mezcle completamente con los gases de escape antes de entrar al reactor de SCR.

Cuando la urea se utiliza como reductor, el amoníaco se forma en una etapa intermedia. Si una cantidad excesiva de agente reductor, urea o amoníaco, se inyecta en el gas de escape, el amoníaco se emite a la atmósfera. Además de ser un contaminante, el amoníaco puede causar corrosión en el sistema de gases de escape. Por último en cuanto a la preocupación sobre cómo hacer catalizadores disponibles o cómo deshacerse de ellos en el final de su vida útil, el material catalizador que se utiliza en los sistemas SCR es ampliamente conocido y está disponible a nivel mundial. Por otra parte, hay compañías que se especializan en la fabricación de catalizadores para su uso en aplicaciones de SCR, y estas empresas garantizan los materiales necesarios para fabricar y vender su producto para satisfacer la demanda marítima. Sólo como referencia estas empresas son Haldor Topsoe, Johnson Matthey, Hitachi Zosen, Tenneco etc.

A continuación describiremos los elementos que conforman un sistema SCR y en qué consiste su funcionamiento:

- a) Sistema de inyección:** Es el encargado de suministrar el reductor a la corriente de gases de combustión. Es responsables de que el flujo administrado se aporte en la proporción correcta para conseguir la máxima reducción de NO<sub>x</sub>. Esto se consigue gracias a un módulo de administración de agente reductor y a la bomba inyectora que lo introduce en el flujo de gases. El módulo de administración integra varios sensores (temperatura, concentración, nivel...) con el fin de controlar el estado del agente reductor que se está aportando, además de un filtro que elimina cualquier partícula del flujo. La bomba inyectora aporta el agente reductor a alta presión, con un grado de pulverización determinado para cada régimen de flujo.
- b) Agente reductor:** Suele ser amoníaco o urea, y existen diferentes marcas comerciales que suministran sus productos de acuerdo al fin de la instalación. Su modo de empleo se basa en las reacciones expuestas en el apartado correspondiente. Se encuentra almacenado en un recipiente del que aspira la bomba de inyección. Debe mantenerse en unas condiciones adecuadas de almacenamiento para evitar su deterioro y que permanezca a un rango de temperatura determinado.
- c) Agente catalizador:** Es el elemento que hace posible la reacción, acelerando el proceso químico para que ocurra a las velocidades que el flujo de gases de combustión requiere. Su elección viene determinada según criterios de conversión de NO<sub>x</sub> requerida con el fin de cumplir la normativa vigente. Existen varios tipos de agentes catalizadores, en cuanto a materiales (metal, cerámica) y a disposición (laminar, panel). Básicamente, podemos distinguir entre 3 tipos de catalizadores utilizados en sistemas SCR:
- Metales nobles: operan entre temperaturas de 175 a 290°C.
  - Metales de transición: operan entre temperaturas de 260 a 450°C.
  - Zeolitas (mineral): operan a altas temperaturas.

Los metales nobles, platino (Pt) o paladio (Pd), como catalizadores, tienen un poder reductor mayor sobre los óxidos de nitrógeno, pero son menos

selectivos que los metales de transición, por lo que tienen tendencia a reaccionar con el dióxido de sulfuro. Hoy en día los materiales más usados en sistemas SCR son los basados en óxidos metálicos, generalmente de cobre (Cu), cromo (Cr) o hierro (Fe), soportados sobre bases de alúmina, silica o dióxido de titanio. La composición del catalizador y sus propiedades físicas determinan el rango de funcionamiento del sistema, y por consiguiente la cantidad de agente requerido y el coste de la instalación.

**d) Soplador:** Las emisiones de gas de combustión con altos niveles de materia particulada pueden requerir la instalación de un soplador de hollín. Son instalados en el reactor del SCR para reducir el depósito de materia en el catalizador y su consiguiente reducción de rendimiento. También reduce el ensuciamiento aguas abajo a causa de la acumulación de sulfuros.

**e) Pretratamiento de los gases de combustión:** Dependiendo de la temperatura de los gases de escape, es posible que se requiera de un calentador que eleve la temperatura de los mismos a los rangos de funcionamiento del elemento catalizador, por ejemplo si el sistema SCR se coloca después de un depurador. Como ya hemos visto, la temperatura es un factor importante en el rendimiento de los equipos. Por otro lado, se puede reducir el contenido de azufre y la materia particulada antes del SCR, ya que los sulfuros favorecen la desactivación del agente catalizador. Esto se consigue con torres de lavado para los sulfuros y filtros para partículas.

El sistema SCR funciona de acuerdo con lo siguiente:

Cuando se necesita la reducción de NO<sub>x</sub>, el gas de escape se guía a la SCR de acuerdo con la dirección de flujo se ilustra en la figura (8.1.5.4). Cuando no se necesita ninguna operación de SCR, el gas de escape se hace pasar directamente a la turbina en el turbocompresor (T/C) y el SCR se sella por dos válvulas. A pesar de que el reactor se coloca antes de la turbina, la temperatura



del gas de escape es todavía demasiado baja con cargas por debajo de aproximadamente 50%.

Por lo tanto, ha sido necesario desarrollar un "método de carga baja", que se puede utilizar para aumentar la temperatura del gas de escape. La válvula de derivación al cilindro (CBV) aumenta la temperatura del gas de escape mediante la reducción de la masa de aire a través de los cilindros en una cantidad fija de combustión de combustible. Esto significa que se obtienen temperaturas de los gases de escape más altas para el SCR. Los cálculos han demostrado que este método es adecuado, debido a que el flujo de masa a través del T/C se mantiene casi sin cambios. Esto significa que la presión de aire de barrido se mantiene, y por lo tanto que la combustión casi no resulta afectada.

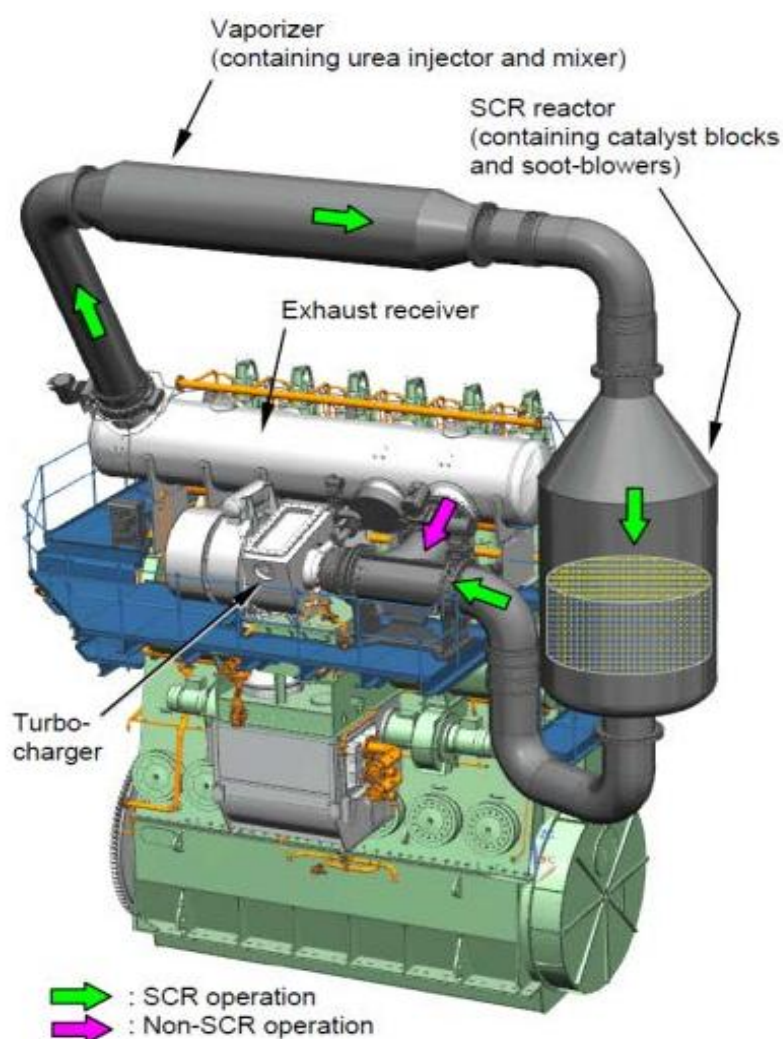


Figura 8.1.5.2 - Sistema SCR integrado en el motor



Figura 8.1.5.3 - Sistema SCR instalado en un motor

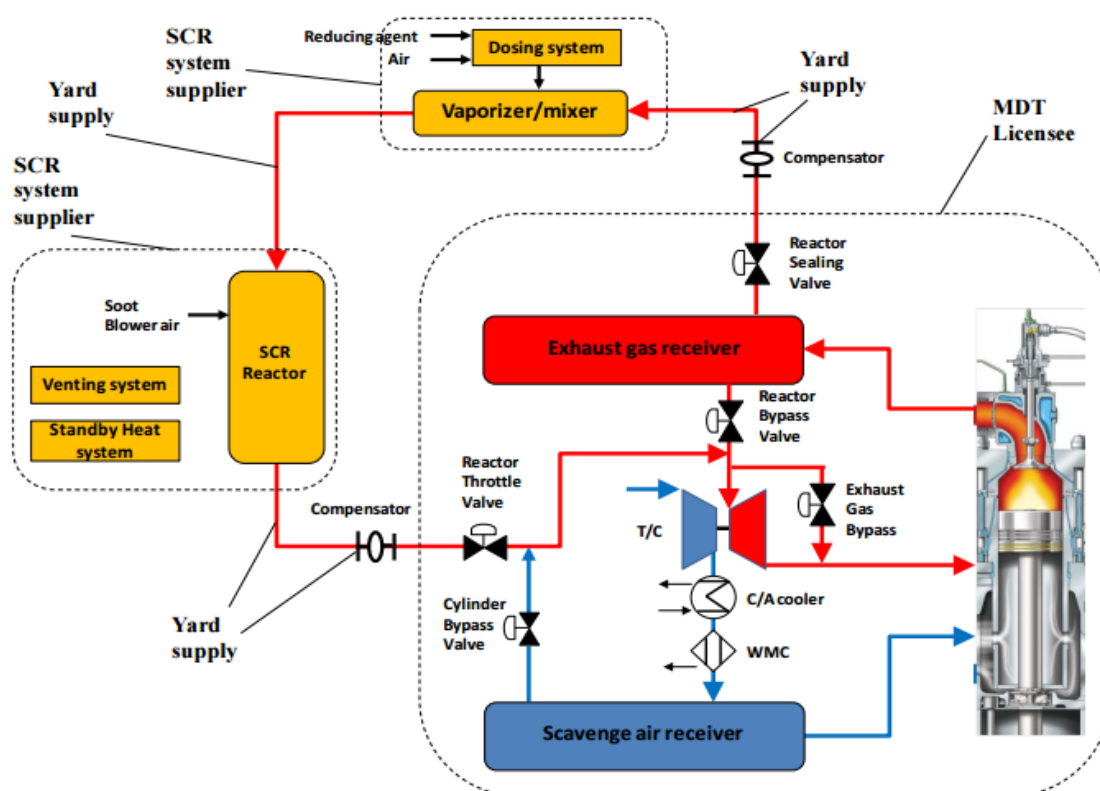


Figura 8.1.5.4 - Esquema de componentes de un sistema SCR



## 8.2 TÉCNICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE SOX

El reequipamiento con depuradores de gases en los buques existentes que ya están contruidos y que navegan en zonas ECA y las nuevas regulaciones futuras respecto al azufre con 0,8 % global, será el mayor desafío para los armadores, los cuales tendrían que hacer un estudio y calcular la cantidad de combustible que consumen dentro de la zona ECA y el tiempo de vida útil del buque. Estos aspectos serian a primera vista los más relevantes para evaluar el uso de algún tipo de tecnología para disminuir las emisiones.

La sociedad de clasificación Det Norske Veritas (DNV-GL), ha creado una nueva notación de clase “SCRUBBER”, para ayudar a los propietarios de buque preparar sus nuevas construcciones para la instalación de un depurador, que aseguran que los preparativos necesarios están en su lugar para su adaptación, y evitar grandes modificaciones en una posterior instalación. Esto ayuda a los armadores a reducir al mínimo su inversión inicial, cuando solicite una nueva construcción de buque, y al mismo tiempo tener la confianza de que cumplirá con las regulaciones de las emisiones actuales y futuras.

La reducción de las emisiones de SO<sub>x</sub> que se forman durante el proceso de combustión en el motor debido a la presencia de contenido de azufre en el combustible. Los siguientes son los métodos y tecnologías utilizadas para reducir las emisiones de azufre de motores marinos.

1. El uso de combustible bajo en azufre
2. Uso de combustibles alternativos.
3. Tecnología de Limpieza de Gases de Escape (Scrubbers)

### 8.2.1 USO DE COMBUSTIBLE DE BAJO CONTENIDO DE AZUFRE

El uso de combustible dentro de la ECA con contenido de azufre por debajo del límite permisible se utiliza con frecuencia en los buques existentes y también puede ser considerado como una opción viable para el cumplimiento de la ECA, al menos en un futuro próximo. El término combustible bajo en azufre es un

término impreciso, pero ha sido comúnmente utilizado para describir combustible destilado en lugar de combustible residual. El término "destilado" típicamente se refiere a combustible diésel ligero, refinado, con un contenido de azufre de 0,5% o menos, este combustible se llama aceite marino de gas (MGO), ISO DMA. Marino diésel oíl (MDO), ISO DMB, a pesar de estar en uno contenido residual también se considera "destilado" proporcionado contenidos de azufre están por debajo de 0,5%. El término "residual" se utiliza para referirse a los aceites combustibles pesados refinados menores, que actualmente tienen contenidos de azufre en promedio de alrededor de 2,5%. Nombres industriales para el aceite combustible residual o pesado (HFO) grados diésel son IFO 180 y IFO 380, correspondientemente ISO RME 25 y ISO RMG35. La definición y descripción de los combustibles diésel son las siguientes:

- **IFO 380:** combustible intermedio con una viscosidad máxima de 380 centistokes (<3,5% de azufre)
- **IFO 180:** combustible intermedio con una viscosidad máxima de 180 centistokes (<3,5% de azufre)
- **LS 380:** bajo contenido de azufre (<1,0%) fuel oíl intermedio con una viscosidad máxima de 380 centistokes
- **LS 180:** bajo contenido de azufre (<1,0%) fuel oíl intermedio con una viscosidad máxima de 180 centistokes
- **MDO:** diésel marino de aceite
- **MGO:** gasóleo para uso marítimo
- **LSMGO:** bajo contenido de azufre (<0,1%) gasóleo para uso marítimo
- **ULSMGO:** combustible de ultra bajo azufre del gas marino referido como diésel ultra bajo azufre (azufre 0,0015% máx.).

El uso de combustible diésel de bajo contenido de azufre para cumplir con los requisitos de la ECA se puede hacer de dos maneras:

1. Cambiar a combustible diésel de bajo contenido de azufre antes de entrar en la zona de control de emisiones.
2. Utilizar combustible de bajo contenido de azufre en todo momento.

La primera opción es el método más común utilizado actualmente por los buques al entrar en las ECA. Se requiere tanques de almacenamiento de combustible separado y sistemas de transferencia de combustible diésel de bajo contenido de azufre y combustible residual, pero la mayoría de los buques que tendrá esta disposición en su sitio. La conmutación toma algunas consideraciones operacionales con los procedimientos adecuados en el lugar, ya que no se han reportado algunos problemas con el apagado del motor durante las operaciones de conmutación. El sistema de combustible y componentes deben ser verificados y modificados según sea necesario con el fin de asegurar la compatibilidad y un funcionamiento fiable cuando se opera con combustible diésel de bajo azufre. Para motores de dos tiempos de baja velocidad, puede ser necesario evaluar el uso de diferentes aceites de lubricación de cilindros cuando se opera en diferentes aceites combustibles por períodos extendidos.

La segunda opción es la más sencilla, pero debido a los mayores costos de combustible diésel de bajo azufre que se espera que tenga una penalización de un aumento de los costos de operación (OPEX). Para las embarcaciones que operan en su mayoría dentro de la EPA, esta opción es una opción de cumplimiento correspondiente. La mayor parte de los buques más pequeños dentro de la ECA y las vías navegables interiores (por ejemplo, remolcadores, barcos de trabajo, los transbordadores y los buques de pesca) con motores de media y alta velocidad están operando actualmente con el combustible diésel de bajo azufre. El uso de combustible diésel bajo en azufre será garantizar el cumplimiento de los requisitos de las emisiones de SO<sub>x</sub>, pero el cumplimiento de la próxima restricción de las emisiones de NO<sub>x</sub> en la ECA no cumple con la tecnología de los motores existentes a menos que se utilice tratamiento después del escape. Los fabricantes de motores continúan investigando y desarrollando la tecnología para cumplir con los requisitos más estrictos a las emisiones de NO<sub>x</sub>. Se espera que esto implicará la recirculación de gases de escape (EGR) con el fin de reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>.

### 8.2.2 USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Al tratarse de una solución bastante reciente, la normativa internacional IMO se encuentra aún en fase de desarrollo a pesar de que las Sociedades de Clasificación ya han establecido sus propias normas basadas en su experiencia.

Un obstáculo para la flota existente es el coste del cambio a motores duales. Esto puede hacerse cambiando los motores o en algunos casos modificando algunas partes de los existentes, si bien los armadores generalmente prefieren el cambio total, porque así el motor que se quita aporta un valor residual. Se estima que esta operación tiene un período de retorno de la inversión de unos 4 años para buques que navegan entre puertos europeos.

Otro factor que está retrasando el desarrollo del consumo de LNG por los buques es la falta de infraestructura de abastecimiento en los puertos, aunque las empresas proveedoras de gas ya están dedicando importantes inversiones para adaptar las terminales portuarias de los países más desarrollados. En cualquier caso los buques que naveguen por zonas donde no exista garantía de suministro de gas tendrán que seguir consumiendo combustibles líquidos.

Por último no podemos dejar de mencionar el hecho de que todo lo que suena a gas lo consideramos equivalente a riesgo de accidentes. Sin embargo, en el caso del gas natural no debería ser así por el excelente nivel de seguridad que han demostrado los buques metaneros.

Desde el punto de vista del almacenamiento, el LNG precisa mayor espacio que su equivalente en combustible líquido, ya que un litro de LNG viene a ser equivalente a 0,6 litros de gasoil y requiere tripulaciones con formación adecuada.

### 8.2.3 TÉCNICAS DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE (SCRUBBERS)

Los depuradores de gases o torres de lavado, a pesar de ser un mercado con muchos años de experiencia en tierra, es relativamente nuevo y desconocido en el mundo naviero, por lo que genera desconfianza en su selección ya sea por la falta de pruebas en su eficiencia, como lo complejo de su adaptación dentro del reducido espacio en el cuarto de máquinas principalmente de sus elementos auxiliares. Aunque ha ganado terreno en su implantación y futuro uso en nuevas construcciones por el interés que despierta como alternativa al uso de combustibles con menos contenidos de azufres y más caros que los tradicionalmente combustibles residuales.

El depurador es un dispositivo instalado en el sistema de escape después de el motor o caldera, que trata el gas de escape con una variedad de sustancias incluyendo agua de mar, agua dulce tratada químicamente o sustancias secas, con el fin de eliminar la mayor parte de los SO<sub>x</sub> (>90%) desde los gases de escape y reducir la PM (60-90%) y NO<sub>x</sub> (<10%) en cierta medida. Después del proceso de limpieza, los gases limpios de escape se emiten a la atmósfera. Todas las tecnologías de depuración crean un flujo de residuos que contiene la sustancia utilizada para el proceso de limpieza más los SO<sub>x</sub> y PM eliminado de los gases de escape.

Los SO<sub>x</sub> son solubles en agua. Una vez disuelto, estos gases forman ácidos fuertes que reaccionan con la alcalinidad natural del agua de mar, o la alcalinidad derivada de las sustancias añadidas (normalmente hidróxido de sodio), formando la sal sulfato de sodio soluble, que es una sal natural en los mares. Además, la PM en el escape llegará a ser atrapado en el agua de lavado, añadiendo a los lodos generados por un depurador. Con depuradores secos hidróxido de calcio (Ca (OH)<sub>2</sub>), o cal hidratada, ya que se conoce más comúnmente, reacciona con los SO<sub>x</sub> y sulfato de calcio sólido (CaSO<sub>4</sub>), o yeso, ya que es más conocido, es el producto de la reacción. El flujo de residuos y lodos generados tienen que ser procesados de acuerdo con las directrices de la OMI antes de la descarga al mar, cuando así lo permita, o se almacena y se descarga a tierra como una sustancia de desecho.

Como ya se ha mencionado, Det Norske Veritas (DNV-GL), ha creado una nueva notación de clase para ayudar a los propietarios de buque preparar sus nuevas construcciones para la instalación de un depurador, "SCRUBBER LISTO", que aseguran que los preparativos necesarios están en su lugar para su adaptación, y evitar grandes modificaciones en una posterior instalación. Esto ayuda a los armadores a reducir al mínimo su inversión inicial, cuando solicite una nueva construcción de buque, y al mismo tiempo tener la confianza de que cumplirá con las regulaciones de las emisiones actuales y futuras.

Hoy en día hay aproximadamente 24 fabricantes de depuradores de gases que ofrecen su servicio al sector marino. Los principales fabricantes y suministradores de estas tecnologías la encabeza uno de los mayores fabricantes de motores Wärtsilä seguido de Alfa Laval (otros fabricantes ver Tabla 8.2.3.1).

Principales fabricantes de depuradores	Nº de depuradores instalados por barcos
Wärtsilä <a href="http://www.wartsila.com">www.wartsila.com</a>	38
Alfa Laval <a href="http://www.alfalaval.com">www.alfalaval.com</a>	31
CR Océan Engineering <a href="http://www.croceanx.com">www.croceanx.com</a>	14
Hamworthy <a href="http://www.wartsila.com/hamworthy">www.wartsila.com/hamworthy</a>	11
Clean Marine <a href="http://www.cleanmarine.no">www.cleanmarine.no</a>	10
Green Tech Marine <a href="http://www.greentechmarine.com">www.greentechmarine.com</a>	8
Marine Exhaust Technology <a href="http://www.maexte.com">www.maexte.com</a>	8
AEC Maritime <a href="http://www.aecmaritime.com">www.aecmaritime.com</a>	7
DuPont <a href="http://www.dupont.com">www.dupont.com</a>	7
DeltaLangh <a href="http://www.langtech.com">www.langtech.com</a>	3
Couple Systems <a href="http://www.egcsa.com">www.egcsa.com</a>	1
Saacke <a href="http://www.saacke.com">www.saacke.com</a>	1

**Tabla 8.2.3.1 - Principales fabricantes de depuradores de gases**

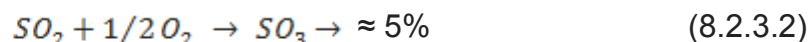
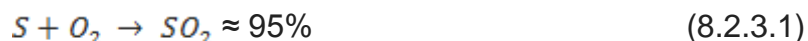
Hay varios diseños diferentes de sistemas de depuración de gases de escape que eliminan los óxidos de azufre de los gases de escape provenientes de los motores diésel y de la caldera del buque con una variedad de sustancias incluyendo agua de mar, y agua dulce tratada químicamente, todos con el fin de eliminar la mayor parte de SO<sub>x</sub> y reducir las PM en cierta medida. Al final del

proceso de limpieza se genera un flujo de residuos que hay que tratar y el lodo producido debe almacenarse para su posterior descarga a tierra.

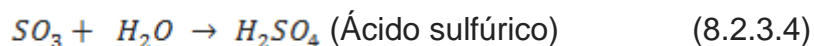
En el proceso principal de lavado, la primera etapa los gases de escape disminuyen su temperatura al pasar por el economizador de gases de escape (opcional) de hasta 350 °C a 160-180 °C. En la segunda etapa, el gas de escape es tratado en un eyector especial donde se enfría aún más mediante la inyección de agua y donde la mayoría de las partículas de hollín en los gases de escape será eliminada. En la tercera etapa, el gas de escape es conducido a través de un conducto de absorción en el que se rocía con agua y por lo tanto eliminar el dióxido de azufre restante

Los gases de SO<sub>x</sub> son solubles en agua. Una vez disueltos, estos gases forman ácidos fuertes que reaccionan con la alcalinidad natural del agua de mar, o la alcalinidad derivada de las sustancias añadidas (hidróxido de sodio NaOH)) formando la sal de sulfato de sodio soluble, que es una sal natural en los mares. Además, las PM de los gases quedan atrapados en el agua de lavado incorporándose a los residuos generados por el depurador.

Reacción química del azufre en los gases de escape del motor:

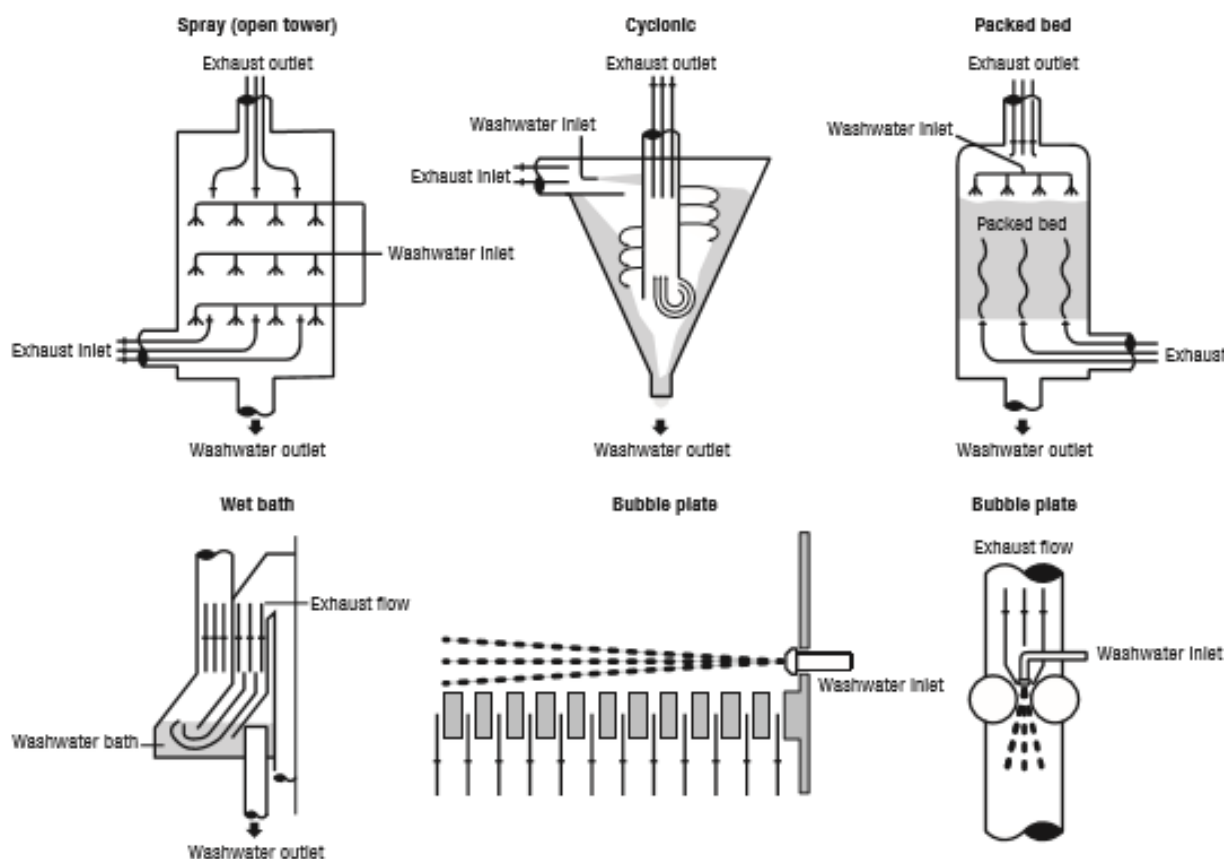


Reacción del SO<sub>x</sub> en el depurador:



Hay dos conceptos básicos comúnmente propuestos para la aplicación de los sistemas de limpieza de gases, el tipo de lavado en seco y el tipo lavado húmedo que a la vez se divide en tres sistemas, sistema circuito abierto, sistema circuito cerrado y sistema híbrido. También se diferencian en su construcción interna. Existen varios tipos de lavadores húmedos.

En la (figura 8.2.3.1), se muestra algunos métodos típicos utilizados por los fabricantes, incluyendo pulverización abierta, ciclónica, de lecho relleno, baño mojado, la placa de burbujas y lavado Venturi.



**Figura 8.2.3.1 - Diferentes configuraciones internas de depuradores.**

Fuente: <http://www.egcsa.com>





**Figura 8.2.3.2 - Tipos de depuradores de gases usados a bordo de buques.**

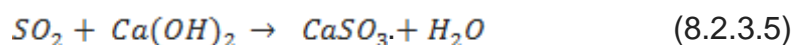
Fuente: Alfa Laval

### **8.2.3.1 Depurador de gases en seco**

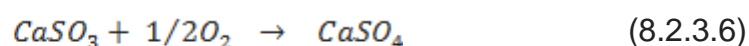
Un depurador en seco no utiliza agua ni otro tipo de sustancias líquidas para llevar a cabo el proceso de lavado, solo contiene cal hidratada granulada que en contacto con los gases de escape crean una reacción química que elimina los compuestos de  $\text{SO}_x$  de la emisión.

Dado que los gases de escape no pasan a través del agua no se enfrían y, por tanto, los depuradores secos pueden ser colocados antes de un economizador de gases de escape (EGE) o ser utilizado conjuntamente con las unidades de un sistema reactor catalítico (SCR) que normalmente requieren la temperaturas de los gases de escape por encima de  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  para permitir que los catalizadores funcionen correctamente, tanto para reducir emisiones de  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ . Los depuradores secos utilizan hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  conocido como cal

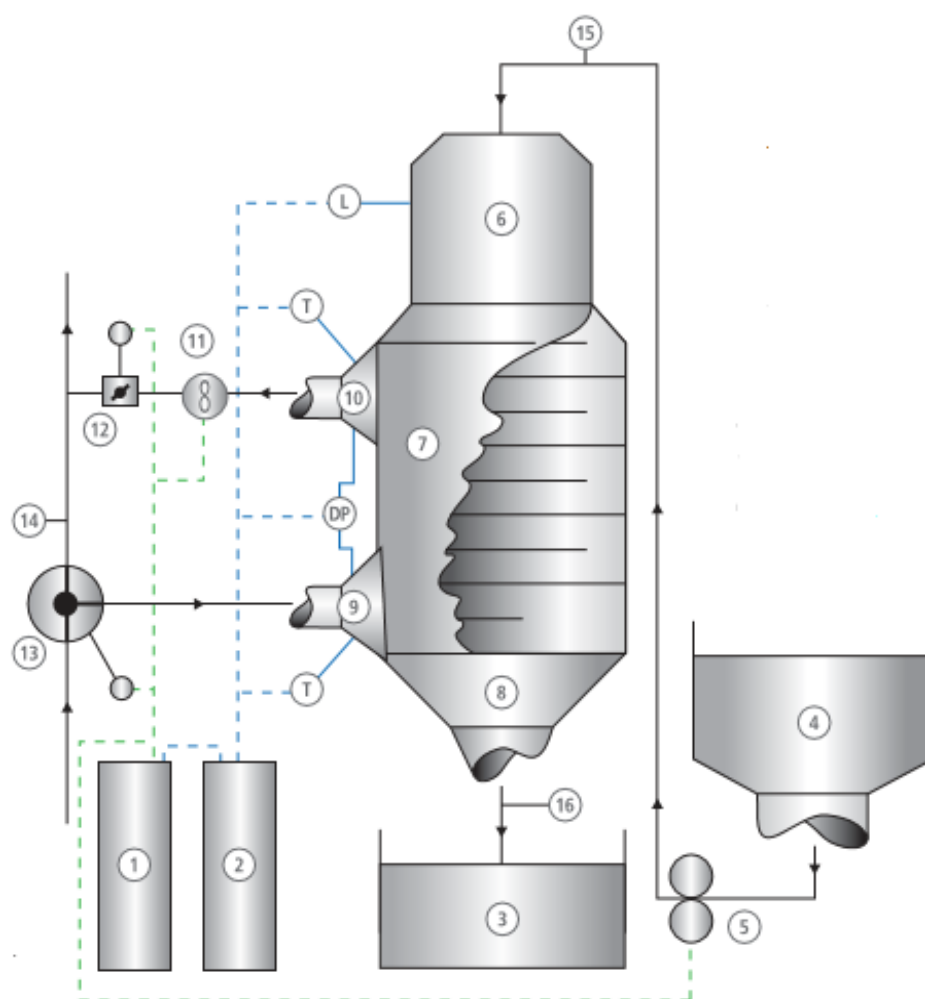
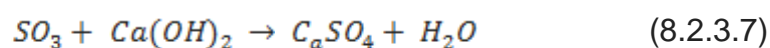
hidratada, que reacciona con el dióxido de azufre  $SO_2$  para formar el sulfito de calcio  $CaSO_3$ :



El sulfito de calcio se oxida en el aire para formar sulfato de calcio dihidratado (comúnmente conocido como yeso):



La reacción con el trióxido de azufre es:



**Figura 8.2.3.1.1 - Depurador de gases tipo seco, principales componentes**

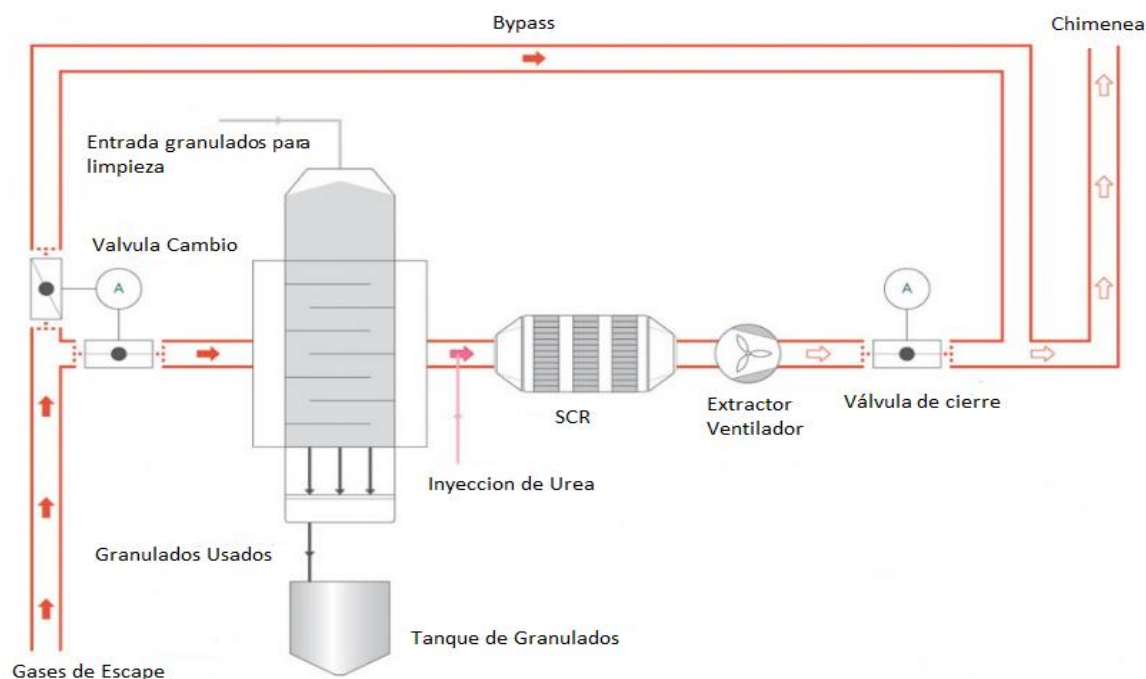
Principales componentes del depurador tipo seco (figura 8.2.3.1.1):

1. Cabina de control.
2. Cabina de monitoreo.
3. Residuos de la reacción.
4. Tanque de granulado.
5. Bomba neumática inyección.
6. Zona inyección granulado.
7. Depurador.
8. Productos reactivos.
9. Entrada de gases.
10. Salida de gases.
11. Ventilador extractor.
12. Válvula de insolación.
13. Válvulas 3 vías/bypass.
14. Conducto de gases.
15. Entrada de granulados.
16. Salida productos reactivos.

El depurador en seco funciona por la alimentación de bolitas de granulados tratados de cal hidratada a través de un absolvedor de lecho empaquetado. La cal hidratada reacciona con los gases de escape y absorbe los componentes de  $\text{SO}_x$  para formar gránulos de yeso, una sustancia inocua no tóxica, que se utiliza comúnmente en la fabricación de paneles de yeso que se utiliza en la construcción de casas. Los gránulos se retiran del depurador y se almacena a bordo para la eliminación de tierra. Transporte de los gránulos hacia y desde el depurador se consigue neumáticamente. Se requiere una derivación de gas de escape para los períodos en que la torre de lavado no está en funcionamiento o cuando no se requiere su funcionamiento. Las pruebas realizadas por el fabricante Couple Systems muestran una eficacia de eliminación de  $\text{SO}_2$  del 99% y de PM 60% aproximadamente. Wärtsilä.

Este sistema de lavado en seco demuestra interés principalmente para los buques que navegan en zonas de control de óxidos de nitrógeno ya que como

mencionamos anteriormente se puede combinar con un sistema reductor catalítico selectivo dando mejores resultados de cumplimiento con todas las regulaciones (figura 8.2.3.1.2).

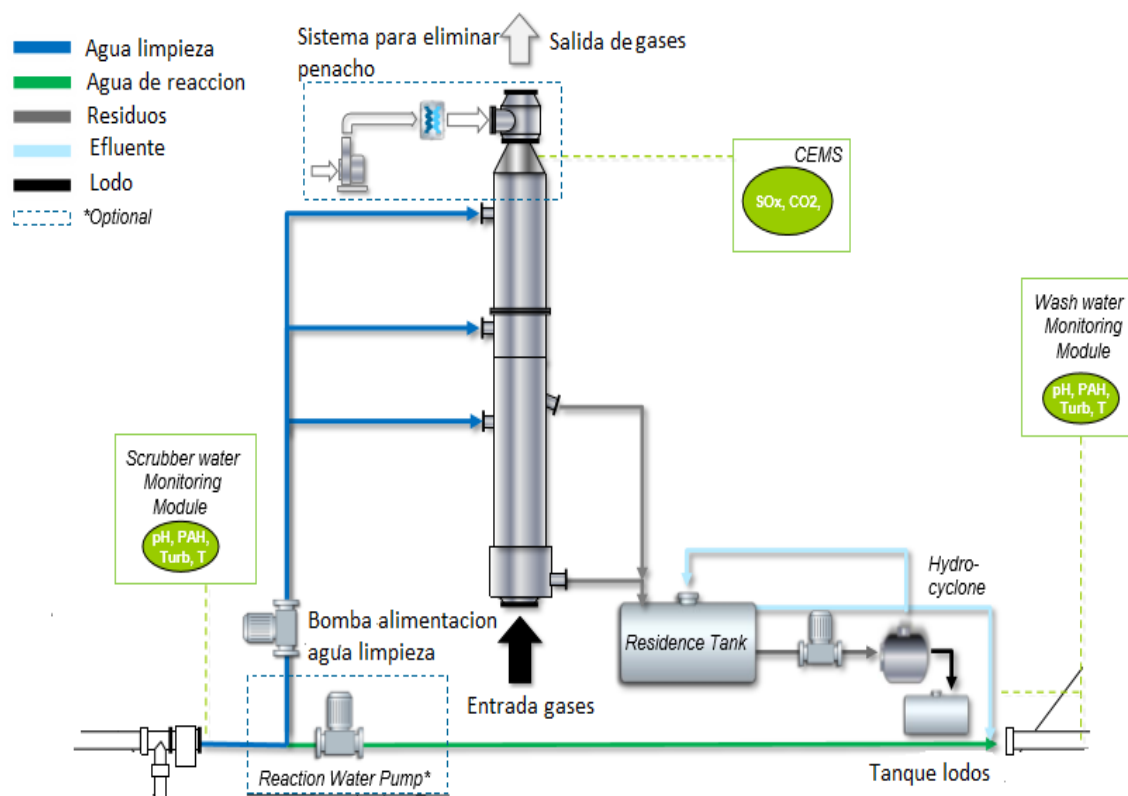


**Figura 8.2.3.1.2 - Sistema combinado SCR con depurador de gases**

### 8.2.3.2 Depurador de gases húmedo en circuito abierto

Un depurador de circuito abierto limpia el gas de escape directamente con agua de mar aprovechando su natural alcalinidad para neutralizar los  $\text{SO}_x$ , que luego es descargado de nuevo al mar. Esto implica la menor cantidad de equipos, lo que significa un menor coste de inversión e instalación más simple. Del mismo modo, significa que el costo de operación más bajo posible, ya que no hay consumibles.

Sin embargo, un sistema depurador de sistema abierto no puede llevar a cabo de manera adecuada en aguas de baja alcalinidad, tales como las aguas del norte del Mar Báltico. Además, su uso puede estar limitado por la legislación de descarga local respecto a fuentes.



**Figura 8.2.3.2.1 - Circuito de limpieza de gases tipo abierto.**

Fuente: <http://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/presentation-o-env-exhaust-gas-cleaning-systems.pdf?sfvrsn=10>

Principales componentes del sistema:

- a) Unidad de limpieza o depurador:** la unidad de lavado está hecha de aleación de acero de alto grado para resistir la corrosión, y debe ser adecuado para la vida de la nave. El cuerpo principal es cilíndrico que proporciona una estructura rígida. El gas de escape entrará en el cuerpo principal a través de una o varias Venturi. En el venturi el flujo de gas de escape se regula, por lo que será entre 3-3,5 m/s en la unidad de lavado. La mayor parte de la materia en partículas también se eliminará en el venturi, ya que es donde el gas de escape primero entra en contacto con agua de lavado. Dentro de la unidad de lavado hay dos anillos de boquillas de pulverización, con dos capas separadas de lechos de relleno. Estas capas ayudan a los gases de escape a entrar en contacto con el agua de lavado pulverizada desde las boquillas.

- b) Bomba de agua de limpieza:** las bombas de agua de lavado se instalan para el transporte de agua de mar de la caja de mar en el depurador. En el lavador de circuito abierto el flujo de agua es de  $45 \text{ m}^3/\text{MWh}$  (para una reducción de SOx correspondiente a 3,5% de S hasta 0,1% de S).
- c) Módulo de monitoreo del agua de limpieza:** los módulos de monitoreo de agua se colocan tanto en la entrada y salida de un depurador de sistema abierto. Esto permite ver la diferencia en el agua de mar tomada antes y después del proceso de lavado. El sistema controla el pH, PAH, la turbidez y la temperatura.
- d) Tanque de residencia:** incorporado al sistema hay un tanque de residencia, este tanque se ha de revestir internamente con el fin de resistir los efectos de corrosión. El objetivo principal de este tanque es proporcionar un período de residencia de las aguas de lavado para permitir que el gas y el aire se separen del agua para facilitar la separación en los hidrociclones de los productos de la combustión que se encuentran en la corriente de gas y posteriormente enviados al tanque de retención de lodos.
- e) Hidrociclones:** los hidrociclones se utilizan para limpiar el agua de lavado de un sistema de circuito abierto. Los contaminantes se separan en un tanque de lodos y el agua depurada puede ser descargada por la borda. La eficiencia de la limpieza se controla antes de la descarga.
- f) Bomba de retorno de agua de lavado:** con el fin de proporcionar la presión diferencial necesaria a través de los hidrociclones y en algunos casos para ayudar a la descarga excesiva de agua de lavado se instalan bombas de agua para cumplir con esta función. Estas bombas están fabricadas internamente de acero superduplex (alta resistencia a la corrosión) para soportar los efectos de la corrosión del agua de bajo pH.
- g) Tanque de lodos:** los tanques de lodos son contenedores a granel intermedios (IBC) estos tanques deben estar dispuestos de forma tal que permitan el intercambio de tanques cuando esté lleno. El contenido del

depósito lleno, será destinado para la entrega en tierra y no pueden ser incinerados a bordo o descargarse al mar.

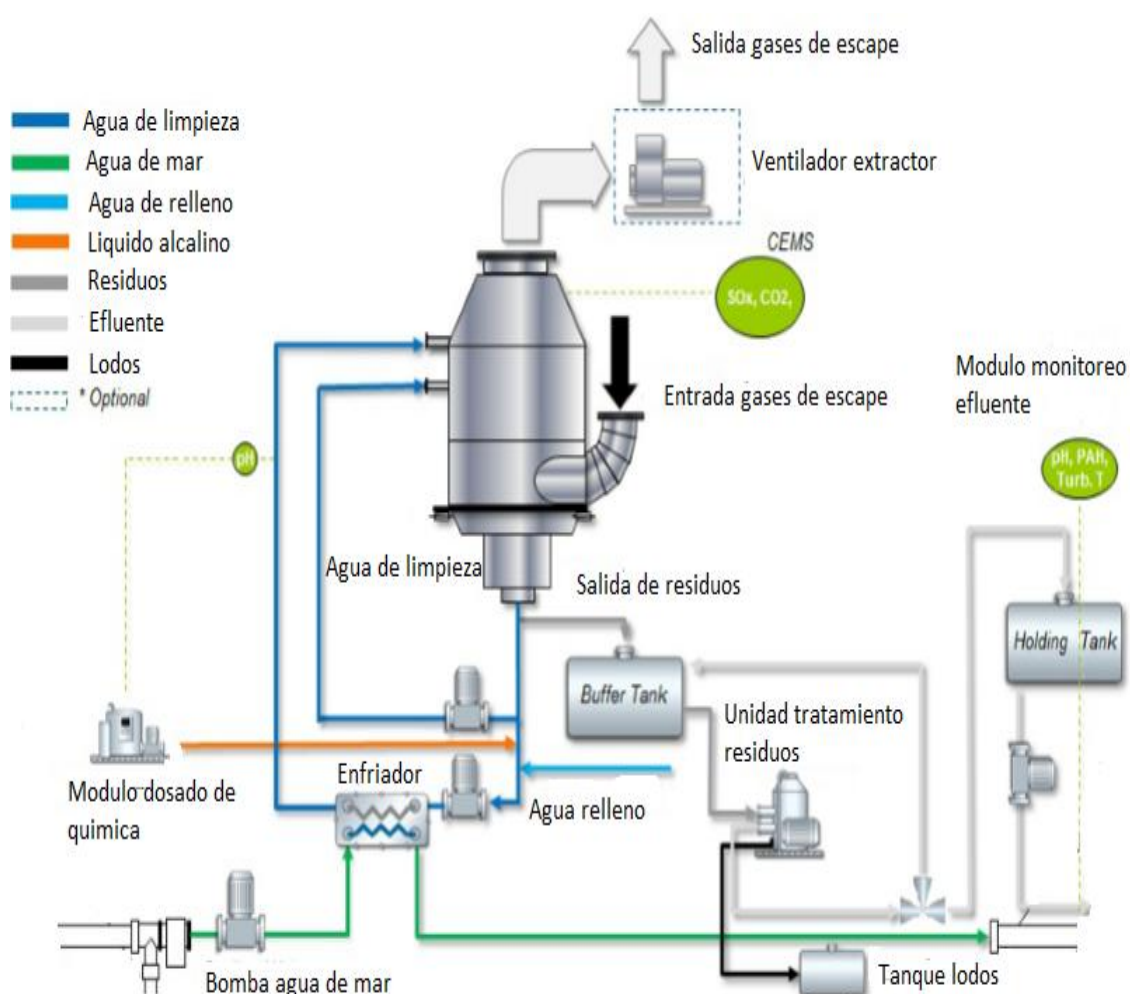
- h) Eliminador del penacho a la salida de la chimenea:** este sistema es opcional, elimina el vapor de agua de los gases de escape después de la unidad de lavado. Esto significa que el humo blanco se elimina y se evita la corrosión en la parte superior del embudo de gas de escape.
- i) Ventilador de gases de escape:** En el depurador multi entrada y en algunos casos en el lavador de entrada única (dependiendo de las limitaciones de contrapresión) un ventilador controlado por frecuencia se utiliza para aspirar los gases de escape de la unidad de lavado. La velocidad del ventilador se controla en base a la medición de diferencia de presión sobre la tapa de derivación en el amortiguador. El ventilador mantiene una pequeña baja presión en el lado de los gases de escape de derivación para asegurar que el flujo de gases está siempre hacia la torre de lavado, y no a la atmósfera.
- j) Sistema continuo de monitoreo de emisiones (CEMS):** el sistema de monitoreo continuo de emisiones (CEMS) está instalado para medir el  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$ , para garantizar que la eliminación de  $\text{SO}_x$  en el lavador está cumpliendo con los requisitos establecidos por la OMI sobre emisiones. Los resultados de las mediciones se registraran a bordo, para garantizar el cumplimiento de las disposiciones por parte del armador en caso de inspecciones.

### 8.2.3.3 Depurador de gases húmedo en circuito cerrado

Los problemas de rendimiento y de descarga, asociados con el lavado a circuito abierto se evitan con una disposición de circuito cerrado. En el lavado de circuito cerrado, el agua de lavado se dosifica con un aditivo alcalino (generalmente sosa cáustica) y es recirculado. Debido a la recirculación conduce a una acumulación de impurezas y la disminución de efecto de lavado, una porción del agua de

circulación se limpia periódicamente, se descarga y se reemplaza con agua dulce para retener la capacidad. Debido a que un aditivo controla la alcalinidad del agua dentro de la torre de lavado, la alcalinidad del agua es irrelevante. Por otra parte, descarga en el mar se puede evitar por completo durante largos períodos de tiempo.

Los inconvenientes son equipo adicional, que incluye la unidad de limpieza de agua, y un coste de funcionamiento más alto debido a la necesidad de agua dulce y aditivos.



**Figura 8.2.3.3.1 - Circuito de limpieza de gases tipo cerrado.**

Fuente: <http://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/presentation-o-env-exhaust-gas-cleaning-systems.pdf?sfvrsn=10>



Los componentes del sistema depurador de circuito cerrado son:

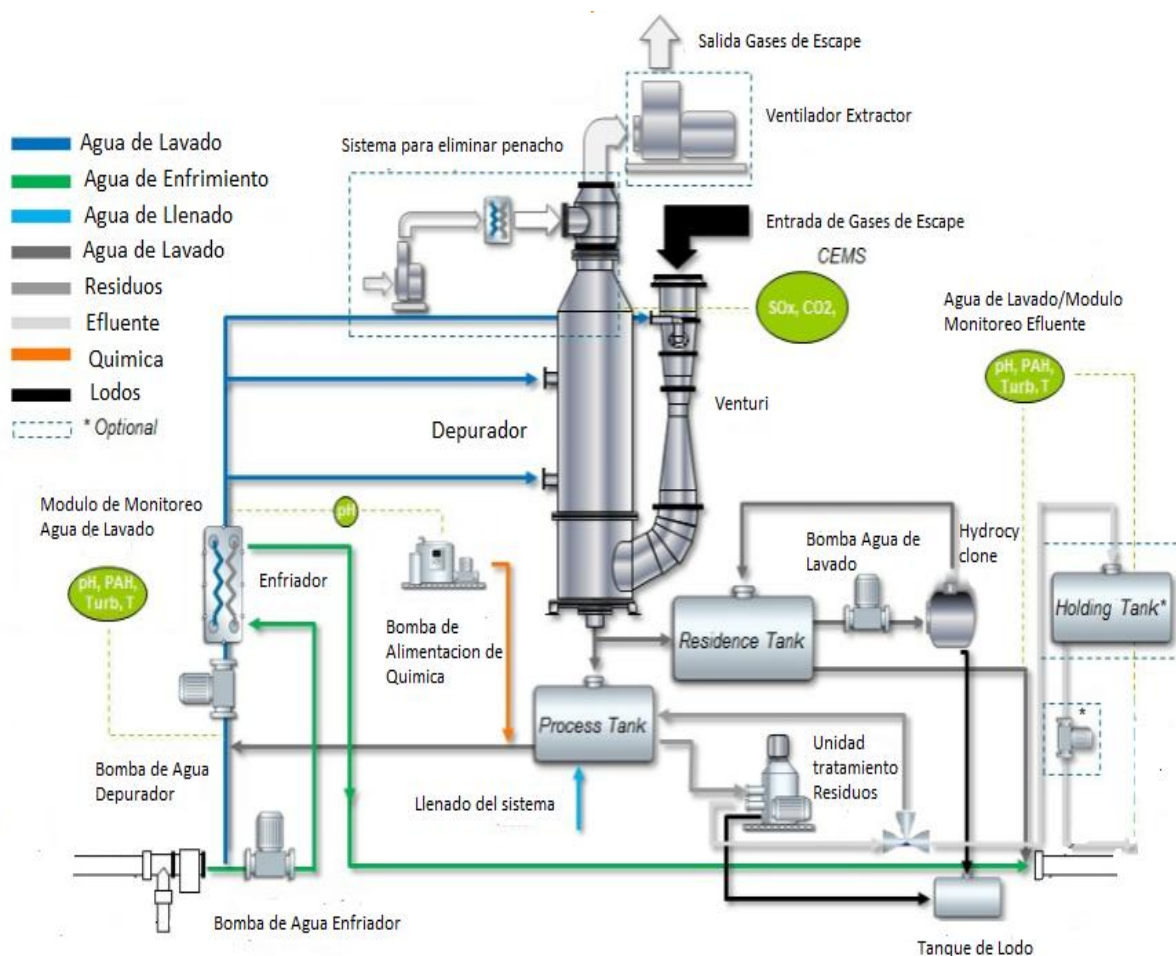
- a) **Tanque de retención:** en situaciones operativas donde se evita la descarga de efluentes, el efluente puede ser desviado desde el módulo de control de efluentes (EMM) a un tanque de retención para la descarga más tarde programada y periódica. El volumen de un tanque de tal almacenamiento debe estar dimensionada de acuerdo con el momento en que el sistema de lavado este para ser operado sin descarga. En funcionamiento normal, el depósito está vacío, excepto una pequeña cantidad de agua siempre está presente en el tanque para formar un bloqueo de agua para evitar la entrada de gas de escape de la torre de lavado a través de la tubería de rebose. El contenido en el depósito de inercia puede ser bombeado a través de la EMM para la descarga directa al mar o a la unidad de tratamiento de agua para una limpieza más profunda.
- b) **Módulo de alimentación alcalino:** el compuesto alcalino se añade automáticamente a la circulación del agua de lavado para mantener el pH del proceso y por lo tanto la eficiencia de remoción de  $\text{SO}_x$ . Típicamente 50% NaOH (hidróxido de sodio), también conocido como soda cáustica o lejía, la solución se utiliza como álcali. En algunos casos, una solución de NaOH al 20% puede ser considerado debido a su bajo punto de congelación. El módulo de alimentación alcalina se compone de dos bombas de dosificación de productos químicos. Una bomba está normalmente en funcionamiento y la otra como stand-by. El consumo de álcali depende de la concentración de la solución, la potencia del motor, el consumo específico de combustible y el contenido de azufre del combustible. El suministro de álcali se controla automáticamente en base a estos parámetros.
- c) **Intercambiador de calor:** el calor de los gases de escape se transfiere al agua de lavado y su temperatura se disminuye en el intercambiador de agua de mar. El propósito de este enfriamiento es reducir al mínimo el contenido de agua de los gases de escape depurados para evitar la

formación del humo blanco por la chimenea. El agua de refrigeración tiene efecto insignificante en la eficiencia de eliminación de azufre de los gases de escape. El sistema está diseñado típicamente para la temperatura máxima de agua de mar de 32 °C. Alternativamente, una temperatura diferente se puede especificar si es requerida. En ambiente frío la temperatura mínima del agua de mar está asegurada por una válvula termostática y una línea de recirculación para evitar la cristalización de los sulfatos en agua de lavado. Es necesario un flujo de agua de mar suficiente para asegurar la refrigeración por agua de lavado.

#### **8.2.3.4 Depurador de gases híbrido**

El sistema de depuración de circuito abierto tiene la ventaja de evitar tanto la compra y gastos en sosa cáustica, como la necesidad de procesar el agua de lavado. El sistema de circuito cerrado tiene las ventajas de que el depurador funciona con la misma eficiencia con independencia de dónde está operando el buque y hay poca o ninguna descarga de agua, por lo que es mejor adecuado para las aguas costeras, portuarias e interiores. A fin de utilizar las ventajas de ambos sistemas, algunos fabricantes han propuesto sistemas de lavado híbridos.

Éstos funcionan como un sistema de circuito abierto cuando se encuentra en el océano abierto; y como un sistema de circuito cerrado cuando está en zona ECA (figura 8.2.3.4.1). El cambio de circuito abierto a circuito cerrado se hace cambiando la succión de la bomba de circulación de agua de mar para el tanque de agua dulce de circulación y el cambio de la descarga del agua de lavado de la descarga en el mar al tanque de circulación.



**Figura 8.2.3.4.1 - Sistema híbrido depurador de gases.**

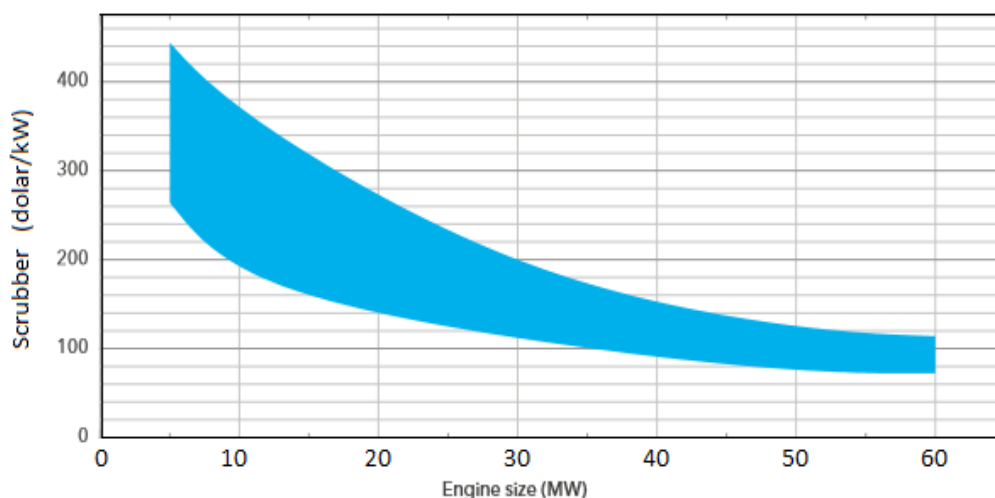
Fuente: <http://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/presentation-o-env-exhaust-gas-cleaning-systems.pdf?sfvrsn=10>



## 9 VALORACIÓN DE LA INSTALACIÓN DEL SCRUBBER

La decisión más importante a la hora de seleccionar un depurador es sin duda la valoración de los precios de combustible, los cuales son variables en el tiempo e impredecibles para poder hacer un análisis aceptado.

Los precios del petróleo son muy volátiles y se ven afectados por el desarrollo tecnológico (métodos avanzados de extracción, o medidas de ahorro de combustible), eventos geopolíticos y las decisiones políticas de los principales productores. Llama la atención que los precios MGO disminuyeron más bruscamente que los demás productos. Esta notable caída de los precios sugiere que la disponibilidad de combustible MGO es acrítico y puede haber incluso un exceso de oferta de MGO. Hay un continuo cambio hacia una mayor producción de MGO y una menor producción de HFO, por ejemplo el aumento de la oferta de MGO de Rusia, el Medio Oriente y los Estados Unidos.



**Figura 9.1 - Relación de precios depurador/potencia motor principal**

Fuente: <http://production.presstogo.com/fileroot7/gallery/DNVGL/files/original/9fef597280b44480b6455332c7886d74.pdf>

De acuerdo con la OPEP la producción mundial de combustibles HFO se ha reducido en un 10% durante el período 2010-2014, mientras que la producción de destilados se ha incrementado en un 7%. Con los precios actuales de los

depuradores según DNV-GL, se puede esperar que para los motores de menos de 5.000 kW de un sistema de lavado costaría aproximadamente \$ 370/kW, para motores de 10.000 kW de potencia esta cae a alrededor de US\$ 250/kW, y para los motores más grandes, el costo puede ser más bajo US\$ 120/kW, tal como se ilustra en la figura 9.1.

El costo es más alto para un motor pequeño, y por lo tanto el retorno de la inversión es más largo para pequeñas embarcaciones. Para los buques de gran tamaño, la inversión relativa es menor, pero la cantidad de tiempo dedicado a operar en zonas de control de emisiones también deben ser considerados.

La alternativa a la instalación de depuradores es el uso de combustibles con bajo contenido de azufre. La diferencia de precios entre HFO y alternativas de bajo contenido de azufre tiene que ser tal que la inversión valga la pena en el tiempo de vida útil de la embarcación.

Para nuestro análisis de viabilidad de la instalación de un depurador de gases, hemos seleccionado como base, el estudio realizado por Green Ship asociación publico privada para la innovación y demostración de tecnologías y métodos que hacen la navegación un medio menos contaminante con la cooperación de las siguientes empresas con sede o delegación en Dinamarca:

- MAN Diesel & Turbo.
- Alfa Laval – Aalborg.
- Maersk Maritime Technology.
- D/S Norden A/S.
- Danish Shipowner Association.
- Lloyd' Register.
- Elland Engineering ApS.

Además, el proyecto recibió aporte y apoyo de los astilleros Fayard A/S (Denmark), Motorenwerke Bremerhaven AG (Germany) y Guangzhou Shipyard International Co. Ltd. (China).

El estudio es basado en el buque tanque de 38.500 DWT, NORD BUTTERFLY, de D/S Norden, cuyas principales características se resumen a continuación:

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL BUQUE	
Eslora	182,86 m
Manga	27,40 m
Calado	9,55 m
Toneladas de peso muerto	38.500 DWT
Motor principal MAN B&W 6S50MC-C7.1 TI	9.480 kW a 127 rpm
Motores auxiliares MAN B&W 3x6L23-30H	960 kW a 900 rpm

**Tabla. 9.1 - Principales datos del buque ejemplo**

A continuación proporcionamos información sobre el supuesto número de días navegando en la mar y puertos. Además de un determinado porcentaje de tiempo en la zona ECA. El análisis se ha realizado en base a una gama de condiciones que varían de 0 a 100% en operaciones en zona ECA.

PERFIL DE LAS OPERACIONES DEL BUQUE EN BASE AL 50% EN ZONA ECA			
	Fuera ECA	Dentro ECA	Total
Días de mar	110	110	220
Días en Puertos	57.5	57.5	115
Días descargando	15	15	30
Total	182.5	182.5	365

**Tabla. 9.2 - Perfil operativo del buque**

El consumo de combustible promedio diario del motor principal y de los motores auxiliares (datos aportados por el armador), se proporcionan a continuación.

Consumos de combustibles motor principal en el mar	Ton/día
HFO	28,7
MGO	27,0
Consumo de combustible motores auxiliares en el mar	
HFO	3,7
MGO	3,5
Consumo de combustible motores auxiliares en puerto	
HFO	4,3
MGO	4,1
Consumo de combustible motores auxiliares en la descarga	
HFO	12,7
MGO	11,9

**Tabla. 9.3 - Consumo de combustible promedio**

Los escenarios considerados en este estudio son por un período de 10 años que van desde 2015 hasta 2025. Suponiendo que el límite global de azufre entrara en vigor en 2020.

El depurador seleccionado para este estudio es un depurador tipo híbrido del cual a continuación daremos detalles de su coste e instalación, datos proporcionados por los astilleros cooperantes con el estudio.

COSTE DE LA INSTALACIÓN DEL DEPURADOR		
Depurador y equipos		2,600,000 USD
Acero (150t)/tuberías/instalación eléctrica y modificaciones		2,400,000 USD
Coste de diseño y clasificación		500,000 USD
Permanencia en astillero	20 días x 17,000 USD	340,000 USD
<b>TOTAL</b>		<b>5,840,000 USD</b>

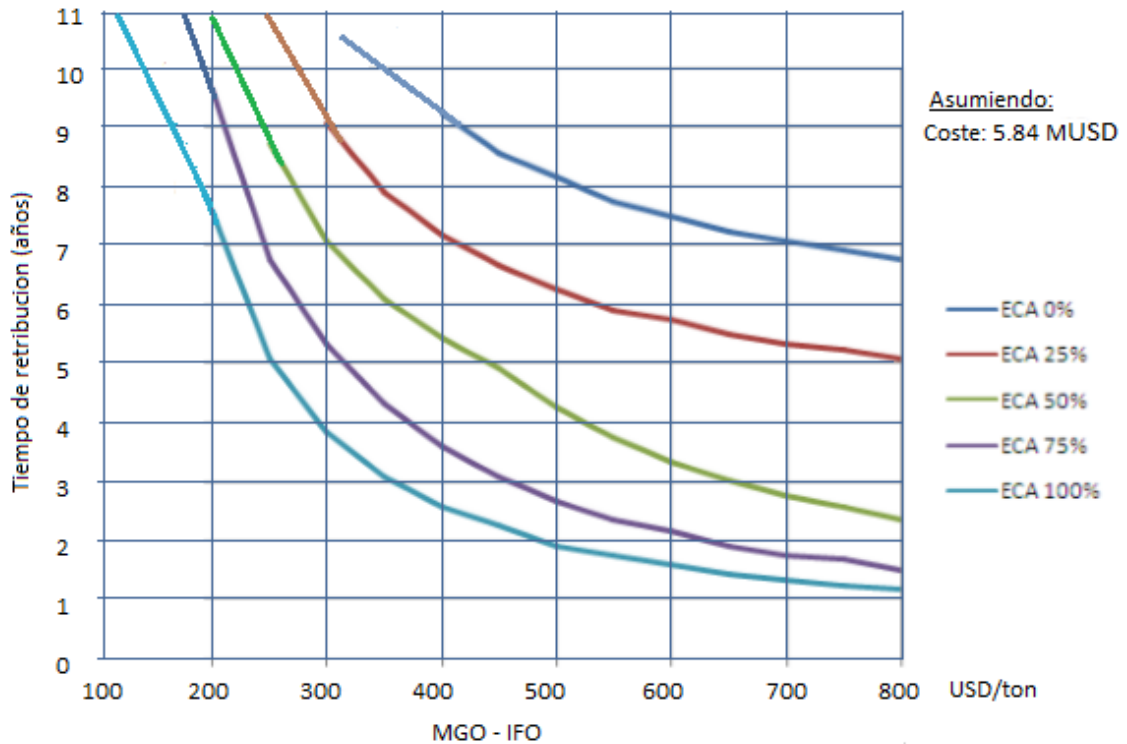
**Tabla. 9.4 - Gastos de la instalación del depurador**

Como se muestra en la (tabla 9.5), entre 2015 y 2016 los precios del combustible han disminuido considerablemente.

Lugar	Coste del Combustible (USD) por Tipo			
	Abril 2015			
	IFO 380 (3.5)	IFO 180 (3.5)	MDO (0.2)	MGO (0.1)
Fujairah	369	338	N/A	737
Houston	343	477	N/A	644
Rotterdam	337	364	N/A	570
Singapore	360	372	664	574
Lugar	Agosto 2016			
Fujairah	240	280	N/A	520
Houston	216	312	N/A	434
Rotterdam	224	250	N/A	390
Singapore	229	241	N/A	396

**Tabla. 9.5 - Comparativa de precios combustible entre 2015 y 2016**





**Figura 9.2 - Tasa de retorno de la inversión en comparación con el coste del combustible y el porcentaje de navegación en zona ECA.**

La diferencia de precio entre el IFO y MGO en agosto de este año, según el lugar de venta, oscilaron entre 167 y 280 USD / ton (ver tabla 9.5). Desde una perspectiva financiera la alternativa de instalar un depurador es potencialmente atractiva cuando el buque tiene que operar una cantidad mayor de tiempo dentro de la zona ECA.

El valor neto y el tiempo de recuperación son muy sensibles a la diferencia de precios entre el IFO y MGO (figura 14.2.7.7), para una diferencia de costo de 280 USD/ton y suponiendo que el precio se mantenga estable, el tiempo de recuperación será de 4 años cuando navegas el 100% en la zona ECA, para un 75% casi 6 años, para un 50% 7 años y medio, y para un 25% aproximadamente 9 años y medio.

Si el tiempo de amortización es de 5 años como máximo, la inversión se consideraría como aceptable, navegando el 100% en la ECA. Si se navega a partir del 75% o menos en la zona ECA, el tiempo de recuperación es más largo, por lo que con este criterio sería más atractivo cambiar a MGO.

En cuanto a la alternativa de la instalación en el buque tanque “NORD BUTTERFLY” de un sistema de lavado de gases de escape, es factible desde el punto de vista técnico, ya que hay suficiente espacio en el área de la chimenea, para colocar los componentes principales del sistema y en la sala de máquinas para equipos auxiliares (figura 9.3).

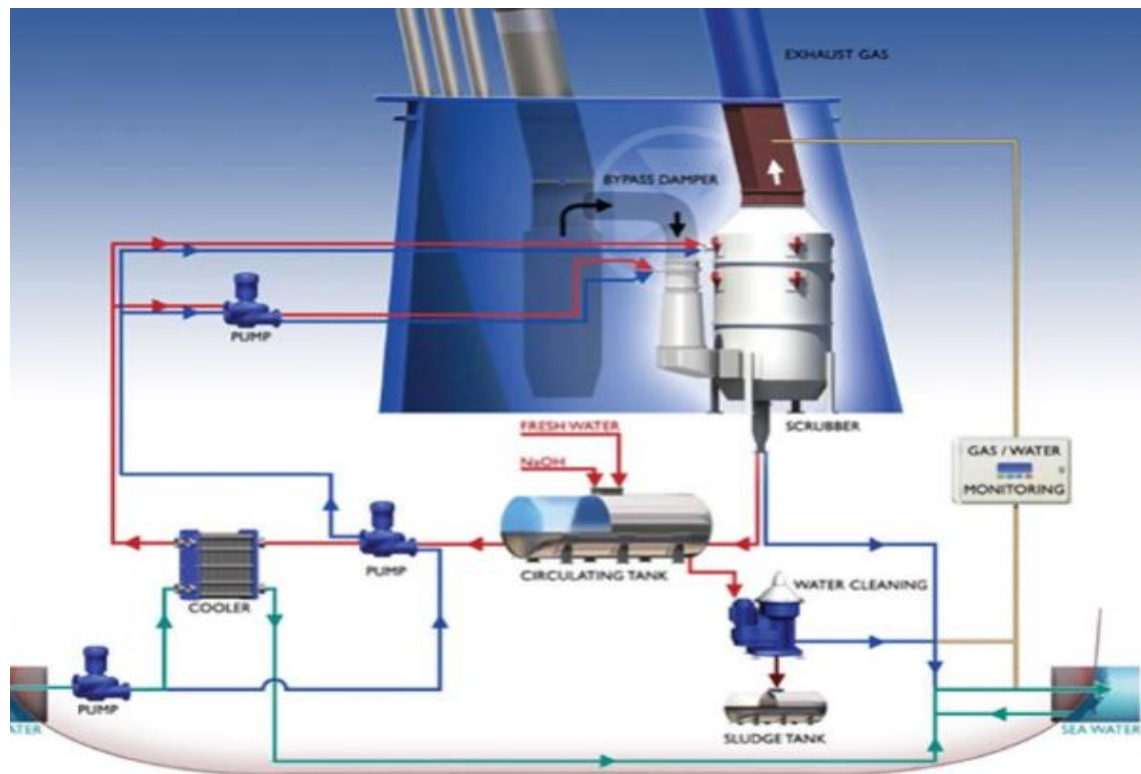


Figura 9.3 - Principales componentes del sistema limpieza de gases

## 10 CONCLUSIONES

En este trabajo se han resumido y puesto a disposición de los ingenieros marinos de la flota mercante los conocimientos básicos, respecto a los medios y sistemas utilizados en el sector, para reducir las emisiones de los gases contaminantes provenientes de los equipos de a bordo, teniendo en cuenta las limitaciones regulativas de emisiones en las zonas de control (a partir del 2020 los límites de azufre serán del 0,5% a nivel global).

Se ha determinado que para lograr dichos objetivos es necesario realizar inversiones, por lo que los armadores se enfrentan a una serie de decisiones importantes en términos de inversión y del comercio si quieren hacer negocios dentro de los futuros límites de emisiones de gases contaminantes. Se ha demostrado que las inversiones son retornables a medio plazo.

Los factores decisivos que influyen en la decisión de inversión para la instalación de un depurador son el costo del combustible y el tiempo de permanencia en una ECA. Si la solución elegida es la opción de combustible significa que si navegan por las ECA tienen que usar combustible bajo en azufre, que actualmente es de aproximadamente 113 dólares por tonelada más caro que el IFO, y con un futuro incierto en cuanto a su precio y disponibilidad. Además, hay tener en cuenta medidas técnicas y operativas en cuanto a garantizar el funcionamiento del motor principal y sistema de combustible, con combustibles de bajo contenido de azufre.

Por otro lado, la selección de un depurador (scrubber) requiere un costo significativo por adelantado, así como los gastos de funcionamiento, pero el ahorro en gastos de combustible puede ser mayores que los costos de instalación, dependiendo del tiempo que pasan en las ECA y la diferencia del costo del combustible entre el IFO y el MGO. Además de esto, el resto de la vida comercial de los barcos es muy importante a considerar antes de la toma de decisiones, debido a la incapacidad de amortización de la inversión antes del final de su vida útil.